

¿TIENE FUNDAMENTO BIOLOGICO LA HOMOSEXUALIDAD?

LA LUNA Y EL ORIGEN DEL HOMBRE

DESARROLLO DE LA CORTEZA CEREBRAL

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

GATO CUANTICO

JULIO 1994
700 PTAS.



Julio de 1994 Número 214

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Santiago Torres: *Bases biológicas de la homosexualidad masculina*; Alina Quevedo: *¿Una determinación biológica?*; Juan Pedro Campos: *Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica*; Esteban Santiago: *Eficacia terapéutica de los interferones*; Luis Bou: *Visiones astronómicas de Chesley Bonestell* y *Juegos matemáticos*; M. Puigcerver: *La Luna y el origen del hombre*; J. Vilardell: *Hace...*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*.

Ciencia y sociedad:

José Manuel García de la Mora y Manuel Puigcerver

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Dan Wagner y Jack Harris/ Visual Logic

Página	Fuente
5-7	Joyce Tenneson
8	Patricia J. Wynne
9	Cortesía de Simon LeVay
10	Jared Schneidman/JSD
11	Edward Bell (*arriba*)
12	Edward Bell
14	Joyce Tenneson
15-17	Patricia J. Wynne
18	*Platones Symposion Erklärt*, por Arnold Hug (Leipzig, 1876)
21	Dan Wagner
22-23	Michael Goodman
24	UPI/Bettmann
25	Michael Goodman
27	Mark Edwards/Still Pictures
41	William M. Carson, Universidad de Alabama en Birmingham
42	Johnny Johnson
43	Howard M. Johnson
44-45	Jared Schneidman/JSD
46	James Holmes/Science Photo Library, Researchers, Inc. (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
47	R. Jonathan Rehg
48-53	Cortesía de Fred Durant, Space Art International
54-56	Ian Worpole
57	Roberto Osti
58	Ian Worpole
59	Roberto Osti
62-66	Rafael Yuste
67	Rafael Yuste (*abajo*), Cortesía de Alejandro Peinado (*arriba*)
68	Rafael Yuste
71-73	Documents Pour la Science
74	G. Williams
75-76	Documents Pour la Science
83	ICONA
85	Bruno Vacaro
86-88	Documents Pour la Science



LA PORTADA retrata cierto gato cinematográfico de Schrödinger. Hay probabilidad de que el material radiactivo emita una partícula que (por medio de un mecanismo que no se ve en la imagen) vuelque una botella de veneno. La opinión imperante en la mecánica cuántica sostiene que un suceso necesita un observador, así que el gato no estará ni muerto ni vivo hasta que no se abra la caja. Hay un punto de vista diferente que rechaza semejante ambigüedad (véase "Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica", de David Z Albert, en este número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El más debatido de los nuevos insecticidas es el dicloro-difenil-tricloroetano, o DDT. Este compuesto químico, muy potente mata los insectos, los piojos. La persistencia del tifus, que el piojo transmite, en el teatro mediterráneo de la guerra actual lo ha revalorizado. Pero la eficacia del DDT en la guerra podría muy bien quedar ensombrecida por su utilidad para la paz. Trabajosas investigaciones han demostrado su eficacia absoluta contra los insectos más destructivos que se alimentan de las cosechas.»

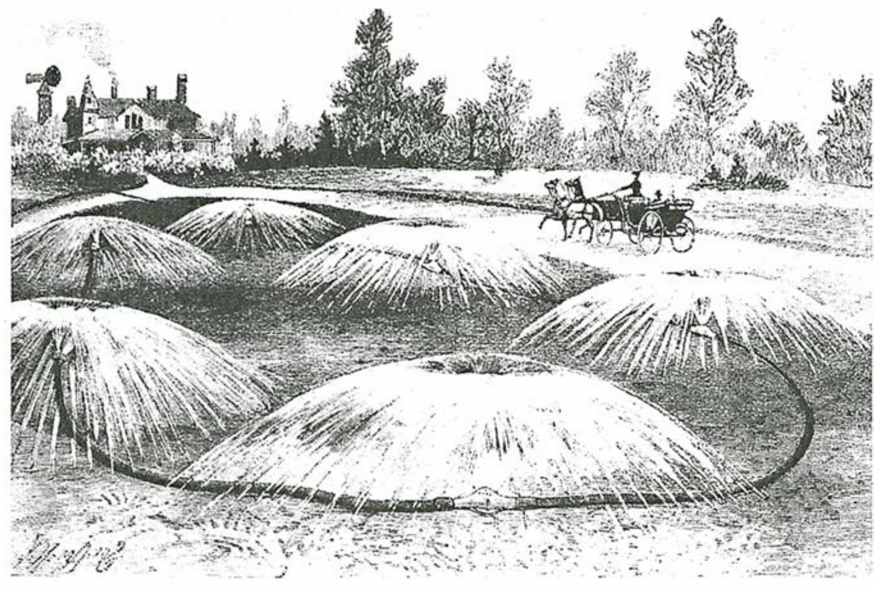
«En muchas fábricas de material de guerra pueden verse obreros golpeando objetos, uno tras otro, delante de un micrófono. El oído humano apenas si capta el ruido, pero de vez en cuando destella una luz y el operario aparta la pieza defectuosa. Se trata de una de las diversas técnicas de nuevo cuño que emplea frecuencias supersónicas en la verificación industrial. El procedimiento permite detectar grietas, diferencias de dureza, variaciones dimensionales y alteraciones en la composición química de numerosos materiales.»

«Recientemente, con el anuncio de la síntesis de la quinina por Robert B. Woodward, de la Universidad de Harvard, y William E. Doering, de Columbia, se alcanzó el éxito en una de las más largas y perseverantes labores de investigación química. Uno de los primeros intentos para conseguir tan importante alcaloide dio como fruto a Sir William Perkin la producción del primer tinte sintético, lo que sentó los cimientos de la moderna industria de colorantes.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Las informaciones sobre la huelga general de los ferrocarriles llenan los periódicos del país. Su inicio se debe al anuncio de la compañía Pullman Car de que no le sería posible continuar trabajando sin reducir los salarios. Los coches Pullman están en explotación en todas las líneas férreas de Estados Unidos y hacia ella apunta el boicot decretado por el Sindicato de Ferrocarriles Americanos al anunciar su negativa a permitir que sus miembros tomen parte en la operación de cualquier tren formado, en todo o en parte, por coches fabricados por Pullman. De ese modo, a partir de una causa que implicaba a unos pocos centenares de obreros, la huelga ha alcanzado unas proporciones enormes y al final se ha convertido en una confrontación entre el gobierno de Estados Unidos y el Sindicato de Ferrocarriles Americanos.»

«El francés M. Bersier ha imaginado un procedimiento mediante el cual la brújula puede ejecutar el papel del timonel. Consiste en que una corriente eléctrica se haga circular a la vez que el buque sigue el rumbo deseado; cuando la embarcación se desvía del rumbo para el cual se ha ajustado la corriente, ésta arranca un motor eléctrico que se pone a funcionar en uno u otro sentido y acciona el timón hasta que el buque recupera el rumbo correcto.»



Tubería de surtidores para riego de césped

«El Dr. Troitzki afirma, en la revista médica rusa *Vratch*, haber descubierto que el pan nuevo y sin cortar no contiene microorganismos. Sin embargo, tan pronto se corta y se deja al aire hay microbios desconocidos, perjudiciales e incluso patógenos, que hallan en él un medio nutritivo excelente. El *Streptococcus pyogenes aureus* conserva su vitalidad en la miga del pan de trigo durante veintiocho a treinta días; el bacilo del tifus permanece activo de veinticinco a treinta días; mientras que el bacilo del cólera vive de veintitrés a veinticinco días.»

«En su alocución a la *Chambre Syndicale des Produits Chimiques*, Mr. Berthelot, el ilustre químico, sugiere como causa de atención por parte de la próxima generación de ingenieros la sustitución de la energía derivada del carbón por energía térmica de procedencia solar. El hundir un conducto hasta una profundidad de tres o cuatro kilómetros no está fuera de las posibilidades de la ingeniería moderna, ni mucho menos lo estará de la futura. A esa profundidad se encontraría agua a una temperatura de 100 a 200 ºC y sería capaz de desarrollar la potencia necesaria para cualquier número de máquinas.»

«Para conservar fresco el césped durante los abrasadores días de estío hay que regar la hierba frecuentemente. Un procedimiento común es disponer un poste hueco provisto en su extremo de una cabeza giratoria perforada. Este, si se conecta a la alimentación de agua de una manguera, arroja una suave lluvia sobre una superficie considerable. Seguidamente, el poste se traslada a otro lugar, donde se repite la operación. El objeto del presente invento (*véase la ilustración*) es llevar a cabo el riego instantáneo de todo el césped sin la intervención de un encargado con sólo girar el grifo.»

¿Tiene fundamento biológico la homosexualidad?



Tenía cuatro brazos, piernas en número igual al de los brazos, dos rostros sobre un cuello circular...; además, cuatro orejas y dos órganos sexuales y todo el resto tal como se puede uno figurar por esta descripción . —Platón, Banquete

A lo largo de los últimos veinte años, los investigadores han aportado pruebas de la existencia de mecanismos biológicos subyacentes bajo la homosexualidad masculina. Simon LeVay, del Instituto de Educación de la Homosexualidad Masculina y Femenina, y Dean H. Hamer, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, resumen sus trabajos en el primero de los dos artículos del debate. William Byne, de la Facultad de Medicina Albert Einstein, sostiene, por contra, que los datos presentados carecen de suficiente solidez.

LeVay, Hamer y Byne cuentan con un predecesor ilustre. Hace unos 2400 años, Platón decía en el *Banquete* que la humanidad estuvo una vez formada por tres sexos: sus miembros estaban unidos en parejas, formadas por dos hombres, dos mujeres o un hombre y una mujer. Zeus separó las parejas, para disminuir su poder e inculcarles el temor a los dioses. Desde entonces, los humanos deambulan por la Tierra buscando a su otra mitad.

Según Platón, el comportamiento de cada sujeto dependía de cuál había sido originalmente su pareja: aquellos cuyo sexo había sido mixto alguna vez, estaban obsesionados por aparearse, y con frecuencia caían en el adulterio, mientras que los que procedían de parejas unisexuales estaban mejor dotados para los asuntos cotidianos del mundo. En particular, los varones que estuvieron unidos a otro varón se hallaban especialmente preparados para el gobierno y el liderazgo. Este mito constituye, quizá, la primera "explicación biológica" de la orientación sexual. Revela, también, que las actitudes hacia el comportamiento homosexual difieren de una cultura a otra.

Bases biológicas de la homosexualidad masculina

Datos relativos a la estructura del cerebro y al ligamiento genético apoyan la existencia de un componente biológico en la homosexualidad masculina

Simon LeVay y Dean H. Hamer

La mayoría de los hombres sienten atracción sexual por las mujeres, y viceversa. Para mucha gente, ése es el orden natural de las cosas, la manifestación cabal del instinto biológico, reforzado por la educación, la religión y las leyes. Sin embargo, una minoría notable de varones y mujeres, cifrados entre el uno y el cinco por ciento, sólo sienten atracción por personas de su mismo sexo. Otros, por último, se muestran atraídos, en grado variable, por hombres y mujeres.

¿Cómo explicar tal heterogeneidad en la orientación sexual? ¿Tiene que ver con nuestros genes, nuestra fisiología, nuestra historia personal o, quizá, con una convergencia de todo ello? ¿Es cuestión de elección más que de tendencia compulsiva?

Probablemente, ningún factor, por sí solo, puede determinar un carácter tan complejo y variable como la orientación sexual. Pero estudios recientes de varios laboratorios, entre ellos el nuestro, indican que genes y desarrollo cerebral desempeñan un papel significativo, aunque todavía no sepamos cuál. Los genes podrían estar detrás de la diferenciación sexual del cerebro y su interacción con el mundo exterior, diversificando su ya amplia gama de respuestas a los estímulos sexuales.

SIMON LEVAY y DEAN H. HAMER investigan las raíces biológicas de la homosexualidad. LeVay se doctoró en neuroanatomía por la Universidad de Gotinga. En 1971 se trasladó a Harvard para trabajar con David Hubel y Torsten Wiesel en el sistema visual del cerebro. Tras una larga estancia en el Instituto Salk de Estudios Biológicos, fundó el Instituto de Educación de la Homosexualidad Masculina y Femenina. Hamer recibió en 1977 su doctorado en química biológica por Harvard. Dirige la sección de estructura y regulación génica del Instituto Nacional del Cáncer, donde estudia el papel de los genes en la orientación sexual y en otras situaciones médicas complejas, como la progresión del VIH y el sarcoma de Kaposi.

Las investigaciones sobre las raíces biológicas de la orientación sexual han seguido dos grandes líneas. La primera gira en torno a observaciones realizadas en el curso de un tipo de estudios distinto: la búsqueda de posibles diferencias físicas entre el cerebro del varón y el cerebro de la mujer; según veremos, el cerebro del homosexual masculino y el del heterosexual pueden tener diferencias curiosamente análogas. El segundo enfoque, de corte genético, se basa en la búsqueda de pautas familiares de homosexualidad y en el examen directo del material hereditario, el ADN.

Desde hace tiempo, los investigadores buscan en el cerebro humano algún tipo de manifestaciones que guarden correlación con el sexo. Tal suerte de diferenciación sexual de las estructuras cerebrales, conocida por dimorfismo sexual, no es fácil de establecer. Por término medio, el cerebro del varón tiene un tamaño ligeramente mayor, acorde con el mayor tamaño del cuerpo. Aparte de eso, un examen somero no revela ninguna diferencia obvia entre los dos sexos. Incluso al microscopio, la arquitectura cerebral del varón es muy similar a la de la mujer. A nadie debe sorprenderle, pues, que las primeras observaciones significativas de dimorfismo sexual se realizaran en animales de laboratorio.

Reviste particular importancia un estudio realizado en ratas, dirigido por Roger A. Gorski, de la Universidad de California en Los Angeles. En 1978, Gorski inspeccionaba el hipotálamo de rata, una región situada en la base del cerebro, que se halla implicada en el comportamiento instintivo y en la regulación del metabolismo. Observó que, en las ratas macho, el tamaño de cierto grupo de células próximas a la parte anterior del hipotálamo multiplicaba varias veces el tamaño del mismo conjunto en las hembras. Pese a tratarse de un grupo celular muy pequeño, de menos de un milímetro de diámetro en los machos, la diferencia entre los sexos es perceptible, incluso sin la ayuda del microscopio, cuando miramos cortes de tejido debidamente teñidos.

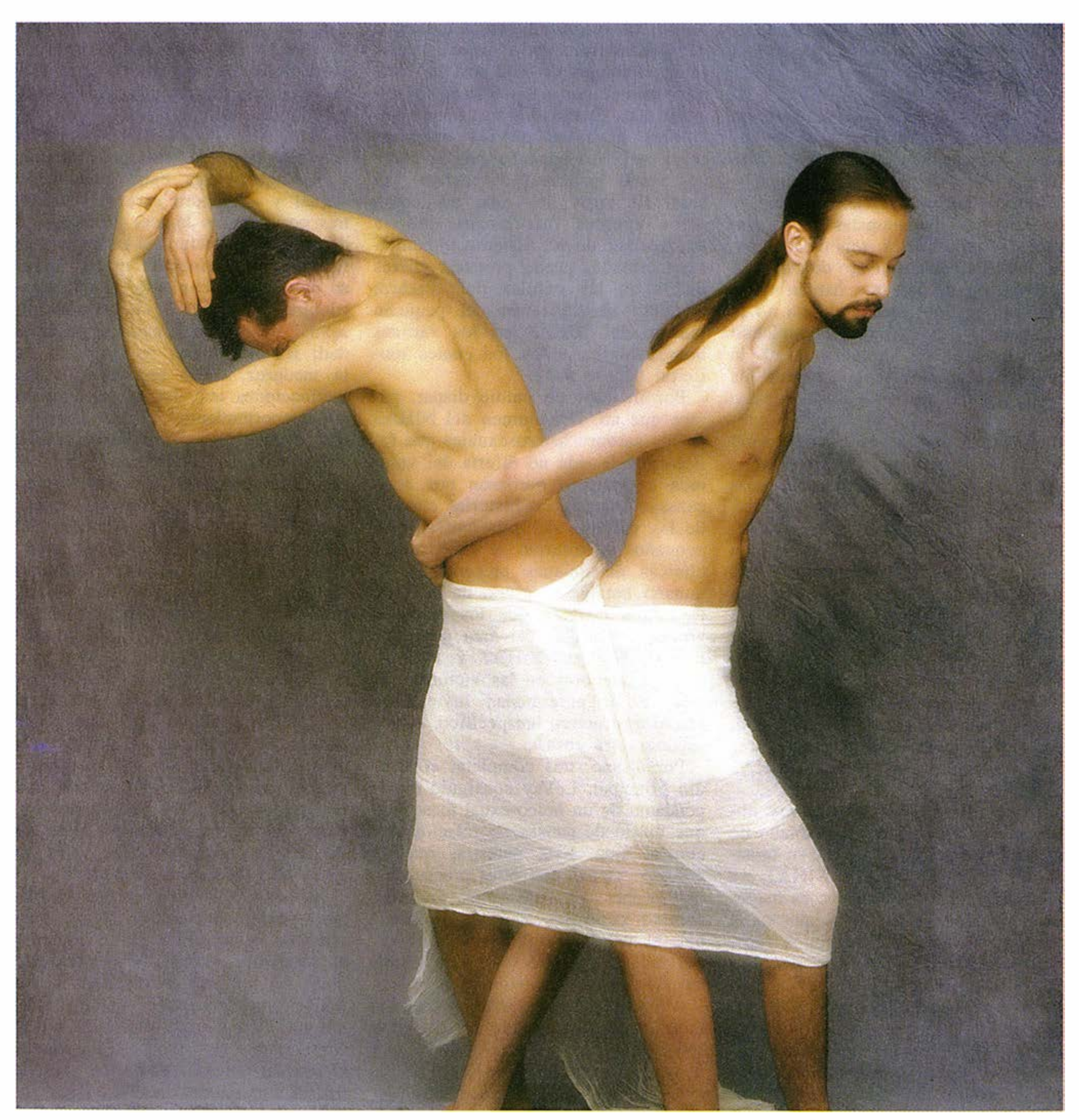
El descubrimiento de Gorski tenía su intríngulis. A la región general del hipotálamo donde reside ese grupo de células, el área preóptica medial, se la ha involucrado en la generación del comportamiento sexual, en particular, en la conducta típicamente masculina. A modo de ejemplo, monos machos con áreas preópticas lesionadas se manifiestan indiferentes a la interacción sexual con las hembras; la estimulación eléctrica de esa región provoca que el macho inactivo se acerque a una hembra para montarla. Conviene señalar, sin embargo, que no se ha encontrado todavía en los monos un grupo de células análogo al identificado, sexualmente dimórfico, en ratas.

Ni tampoco se conoce con exactitud qué función desempeña el grupo de células sexualmente dimórficas de las ratas. Lo que se sabe, de un estudio realizado por Gorski y sus colaboradores, es que los andrógenos —hormonas masculinas— cumplen una misión clave en la generación del dimorfismo durante el desarrollo. Las neuronas de ese grupo de células abundan en receptores de hormonas sexuales, lo mismo de andrógenos —así la testosterona— que de estrógenos, hormonas femeninas. Aunque las ratas machos y hembras parten de un

número casi parejo de neuronas en el área preóptica medial, se produce un pulso de testosterona secretada por los testículos de los fetos machos cuando se acerca el alumbramiento para estabilizar su población neuronal. En las hembras, la falta de testosterona determina la muerte de muchas neuronas de ese grupo, razón de dicha estructura típicamente menor. Curiosamente, las neuronas preópticas son sensibles a los andrógenos sólo unos pocos días antes y después del nacimiento. Si, por castración, eliminamos los andrógenos en una rata adulta, no mueren las neuronas.

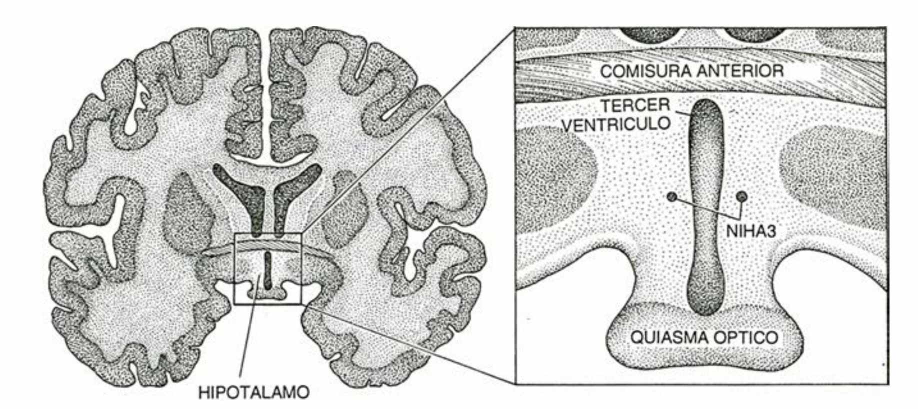
El grupo de Gorski, de la UCLA, en particular su alumna Laura S. Allen, descubrió también estructuras dimórficas en el cerebro humano. El conjunto de células que responde al acrónimo NIHA3 ("tercer núcleo intersticial del hipotálamo anterior"), de la región preóptica medial del hipotálamo, triplica en los varones el tamaño que presenta en las mujeres. (Lo que no obsta para que el tamaño varíe bastante dentro de un mismo sexo.)

En 1990, LeVay, uno de los autores, decidió comprobar si el NIHA3 o cualquier otro grupo de células del área preóptica medial tenía un tamaño que guardase correlación con la inclinación sexual y con el sexo. La hipótesis de trabajo era bastante arriesgada, pues dominaba la idea establecida de que la orientación sexual era uno de los aspectos "elevados" de la personalidad, en el que el ambiente y la cultura desempeñaban un papel esencial. Las informaciones procedentes de fuentes de tal nivel



[Zeus] dividió en dos a los hombres, como los que cortan las serbas para ponerlas a secar, o los que cortan los huevos cocidos con una crin. —Platón, Banquete

1. **HIPOTALAMO de cerebro, examinado para buscar diferencias relacionadas con la orientación sexual. Se tiñeron los hipotálamos de 41 personas y se marcaron grupos de neuronas. En varones, el grupo NIHA3, del área preóptica medial, tenía un tamaño que duplicaba el de las mujeres. De dos a tres veces era también la diferencia entre varones heterosexuales y homosexuales (*micrografías de la derecha*). Este descubrimiento sugiere la existencia de diferencias relacionadas con la inclinación sexual de los varones, de una magnitud parecida a las que se observan en relación con el sexo.**



se supone que son procesadas primariamente por la corteza cerebral, y no por centros "menores", como el hipotálamo.

LeVay examinó el hipotálamo en muestras de autopsias de 19 varones homosexuales, todos los cuales habían fallecido a causa de complicaciones relacionadas con el sida, y en muestras de autopsias de 16 varones heterosexuales, seis de los cuales también habían muerto de sida. (La orientación de los que habían fallecido por motivos ajenos al sida no se determinó. Sin embargo, suponiendo una distribución similar a la de la población general, probablemente los homosexuales no serían más de uno o dos.) LeVay incluyó también muestras de seis mujeres cuya orientación sexual se ignoraba.

Tras etiquetar cada muestra, para eliminar todo sesgo subjetivo de las mismas, realizaron cortes hipotalámicos secuenciales, los tiñeron para marcar los grupos de neuronas y midieron las áreas correspondientes en un microscopio. Con la información sobre el tamaño del área y el grosor del trozo analizado, calcularon el volumen de cada grupo de células. Además del núcleo sexualmente dimórfico descrito por Allen y Gorski, el NIHA3, LeVay examinó otros tres grupos vecinos, los NIHA1, NIHA2 y NIHA4.

Como Allen y Gorski, LeVay observó que, en el varón, el tamaño de NIHA3 duplicaba, de lejos, su tamaño en la mujer. Pero el NIHA3 era también entre dos y tres veces mayor en el hombre heterosexual que en el varón homosexual. En algunos varones homosexuales, el grupo de células faltaba por completo. De los análisis estadísticos se desprendía que la probabilidad de que este resultado se debiese al azar era de uno entre mil. No había diferencia significativa entre los volúmenes del NIHA3 de varones homosexuales y mujeres. Así pues, las investigaciones sugerían la existencia de un dimorfismo relacionado con la orientación sexual del varón, de magnitud pareja a la que se daba en relación al sexo.

En este tipo de estudios, es obligado comprobar si las diferencias estructurales observadas se deben a variables distintas de las que nos interesan. Nos rondaba por la cabeza, como principal sospechoso, el sida. El virus del sida, así como otros agentes infecciosos que se aprovechan de un sistema inmunitario mermado, puede producir graves daños en las células del cerebro. ¿Residía ahí la razón del pequeño tamaño del NIHA3 en los varones homosexuales, todos los cuales murieron de ese mal?

Por indicios de índole dispar, parece que no. El volumen del NIHA3 de los varones heterosexuales que fallecieron de sida no difería del volumen de quienes murieron por otras causas. Además, las historias clínicas de las víctimas del sida con NIHA3 pequeños no diferían de las historias clínicas de quienes presentaban de tamaño notable el grupo de NIHA3. Resultaba también que los restantes grupos de células del área preóptica medial, NIHA1, NIHA2 y NIHA4, no eran menores en las víctimas del sida. Si la enfermedad tuviese un efecto destructivo inespecífico, cabría suponer otra cosa.

Por último, tras completar el estudio principal, LeVay consiguió el hipotálamo de un homosexual masculino que murió de causas no relacionadas con el sida. Esta muestra, que se procesó "ciega" con otras procedentes de varones heterosexuales de edad similar, confirmó el estudio principal: el volumen del NIHA3 del varón homosexual era menos de la mitad que el de los heterosexuales.

Allen y Gorski aportaron otras características del cerebro relacionadas con la inclinación sexual. Vieron que la comisura anterior, fascículo de fibras que cruza la línea media del cerebro, es pequeña en los varones heterosexuales, grande en las mujeres y mayor aún en los varones homosexuales. Una vez hecha la corrección correspondiente atendiendo al tamaño del cerebro, la comisura anterior de las mujeres y la de homosexuales masculinos alcanzaban un tamaño equiparable.

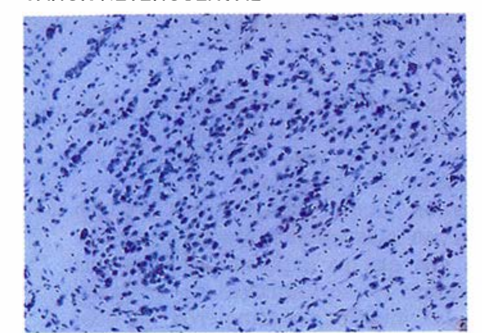
¿Qué decir de estas correlaciones manifiestas entre orientación sexual y estructura cerebral? Caben tres posibilidades lógicas. Primera: las diferencias estructurales están presentes desde un principio, quizás incluso antes del nacimiento, lo que contribuiría a establecer la orientación sexual del varón. Segunda posibilidad: las diferencias se producen en la madurez, como resultado de las inclinaciones sexuales del varón o de su comportamiento. Tercera posibilidad: aunque no existe relación causal, ambas (esto es, orientación sexual y estructura cerebral) se hallan vinculadas a una tercera variable, como podría ser determinado episodio del desarrollo durante la vida perinatal.

No disponemos de datos suficientes para decidirnos por una de las tres. Con todo, lo obtenido en la investigación animal nos permite asegurar la improbabilidad de la segunda posibilidad, según la cual las diferencias estructurales se producen en la etapa adulta. En ratas, por ejemplo, el grupo de células sexualmente dimórficas del área preóptica medial manifiesta cierta plasticidad en su respuesta a los andrógenos durante las primeras fases del desarrollo del cerebro, pero más tarde se torna muy resistente al cambio.

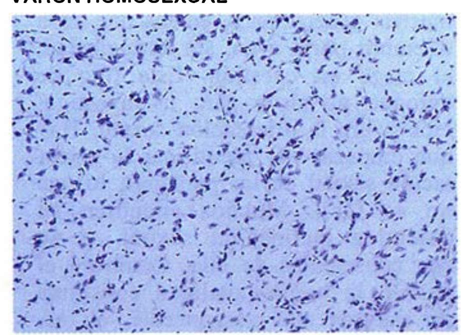
Nosotros, que optamos por la primera posibilidad, creemos que las diferencias estructurales surgen durante el desarrollo cerebral y contribuyen, pues, al comportamiento sexual. La región preóptica medial del hipotálamo de monos está implicada en el comportamiento sexual y, por tanto, el tamaño del NIHA3 de los varones podría condicionar la orientación sexual; pero semejante relación causal es todavía pura especulación.

Admitamos que algunos individuos

VARON HETEROSEXUAL



VARON HOMOSEXUAL



portaran ya diferencias estructurales relativas a la orientación sexual en el momento del nacimiento. ¿Cómo surgieron tales diferencias? Pudieron deberse a la interacción entre esteroides gonadales y cerebro en formación; esa interacción es responsable de las diferencias estructurales entre el cerebro del varón y el de la mujer. Entre los especialistas, hay quienes han sugerido la posibilidad de que algunos fetos queden condicionados o determinados para, alcanzada la madurez, mostrarse homosexuales, por haber padecido niveles de andrógenos atípicos. Sugieren, en particular, que los niveles de andrógenos en los fetos masculinos que devienen homosexuales son insólitamente bajos e insólitamente altos en fetos femeninos que devienen lesbianas.

Parece más probable, sin embargo, que medien diferencias intrínsecas en la respuesta de cada cerebro a los andrógenos durante el desarrollo, aun cuando no diverjan los niveles de hormonas. Este tipo de respuesta requiere una maquinaria molecular compleja, que incluiría a los receptores de andrógenos, y presumiblemente a toda una gama de proteínas y genes cuya identidad y funciones son aún desconocidas.

De entrada, puede parecer absurda la propia noción de genes homosexuales masculinos. ¿Cómo podrían sobrevivir a la "presión" reproductiva darwinista unos genes que "dirigen" a hombres y mujeres hacia personas de su mismo sexo? ¿No son heterosexuales la mayoría de los progenitores de homosexuales y mujeres lesbianas? Ante tales aparentes incongruencias, los investigadores se han centrado en genes cuyo papel sería el de influir en la orientación sexual, más que determinarla. En la búsqueda de esos genes se han tomado dos caminos principales: estudios de gemelos y familias, y análisis de ligamiento en el ADN.

Los estudios de gemelos y árboles familiares parten del principio según el cual los rasgos de base genética se transmiten entre los miembros de la familia. El primer estudio moderno sobre patrones de homosexualidad en familias fue publicado en 1985 por Richard C. Pillard y James D. Weinrich, de la Universidad de Boston. Desde entonces han aparecido otros cinco estudios sistemáticos sobre gemelos y hermanos de varones homosexuales y mujeres lesbianas.

Y éstas son las cifras recogidas para el caso de los varones: aproximadamente el 57 % de los gemelos idénticos, el 24 % de los gemelos fraternos y el 13 % de los hermanos de varones homosexuales son también homosexuales. Para las mujeres, aproximadamente el 50 % de las gemelas idénticas, el 16 % de las gemelas fraternas y el 13 % de las hermanas de lesbianas, son también lesbianas. Cuando se comparan esos datos con las tasas normales de homosexualidad, resulta evidente la existencia, en los dos sexos, de un agrupamiento familiar importante en la orientación sexual. En ese contexto, J. Michael Bailey y sus colaboradores, de la Universidad del Noroeste, estiman que la heredabilidad global de la orientación sexual (proporción de varianza debida a los genes) es del 53 % para los hombres y del 52 % para las mujeres. (El agrupamiento familiar es más evidente para parientes del mismo sexo, y no tanto para las parejas hombre-mujer.)

Para evaluar el componente genético de la orientación sexual y aclarar su modo de herencia, hay que abordar un rastro sistemático y exhaustivo de las familias de homosexuales y lesbianas. Hamer (coautor de este artículo), Stella Hu, Victoria L. Magnuson, Nan Hu y Angela M. L. Pattatucci, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, han incoado esa línea de trabajo, que forma parte de otra más amplia y cuyo objetivo es investigar los factores de riesgo para determinados cánceres que se concentran en ciertos segmentos de la población homosexual masculina.

Los estudios provisionales sobre varones, realizados por el equipo de Hamer, confirman los resultados sobre hermanos, llevados a cabo por Pillard y Weinrich. El hermano de un varón homosexual tiene un 14 % de probabilidad de serlo él también, cuando en el caso de los que no tienen un hermano homosexual masculino es del 2 %. (El estudio utilizó una definición hiperrestrictiva de homosexualidad, lo que explica la baja tasa media.) Entre parientes más lejanos se descubrieron pautas menos esperadas: los tíos maternos tenían un 7 % de probabilidad de ser homosexuales, mientras que los hijos de tías maternas tenían una probabilidad del 8 %. Padres, tíos paternos y los otros tres tipos de primos no presentaban correlación alguna.

Aunque la investigación apuntara hacia la existencia de un componente genético, la homosexualidad ocurría con mucha menos frecuencia de lo que cabría esperar para un gen con una herencia mendeliana simple. Cabe la posibilidad de que los genes sean más importantes en unas familias que en otras; y eso es lo que parece observarse en las familias con dos hermanos varones homosexuales. Comparadas con familias elegidas al azar, la tasa de homosexualidad en tíos maternos sube del 7 al 10 %, y en primos maternos del 8 al 13 %. Este agrupamiento familiar, incluso en parientes fuera del núcleo familiar principal, respalda la hipótesis de una raíz genética en la inclinación sexual.

¿Por qué los varones homosexuales tienen más parientes masculinos de su misma inclinación en la rama materna de la familia? Una posibilidad, que los individuos conocieran mejor sus parientes maternos, parece improbable, porque los parientes homosexuales masculinos, de sexo opuesto, de homosexuales y lesbianas presentaban una similar distribución en ambas ramas familiares. Otra explicación es que la homosexualidad, aunque transmitida por ambos progenitores, sólo se expresa en un sexo, en este caso los varones. Cuando se expresa, el carácter reduce la tasa reproductiva y, por tanto, se transmite por la madre de forma desproporcionada. Un efecto de ese tipo puede explicar parcialmente la concentración de parientes homosexuales de varones homosexuales en la rama materna de la familia. Mas, para confirmar esta hipótesis, será necesario encontrar un gen apropiado en un cromosoma autosómico, y que además lo transmita cualquier progenitor.

Una tercera posibilidad reside en

el ligamiento al cromosoma X. Los varones portan dos cromosomas sexuales: el Y, que heredan de su padre, y el X, que heredan de su madre, que tiene dos. Por tanto, cualquier carácter condicionado por un gen presente en el cromosoma X tenderá a ser heredado por la rama materna, y se observará preferentemente en los hermanos, tíos maternos y primos maternos, lo que coincide exactamente con el patrón observado.

Para comprobar esta hipótesis, Hamer y sus colegas se embarcaron en un estudio de ligamiento del cromosoma X en varones homosexuales. El análisis de ligamiento se funda en dos principios genéticos. Si un carácter está condicionado genéticamente, los parientes que comparten el carácter compartirán también el gen, con una frecuencia mayor de lo que cabría esperar por puro azar. Eso es cierto, aunque la influencia ejercida por el gen sea mínima. Además, los genes que se alojan próximos en el cromosoma se heredan casi siempre juntos. Por consiguiente, si hay un gen que influye sobre la orientación sexual, debería estar "ligado" a algún marcador de ADN cercano que tienda a "viajar" junto a él por la familia. Para caracteres afectados por un solo gen, el ligamiento puede localizar al gen con bastante precisión dentro de un cromosoma. Para caracteres complejos, como la orientación sexual, el ligamiento también ayuda a determinar si realmente hay o no un componente genético.

A la hora de iniciar un análisis de ligamiento de la orientación sexual masculina, resultaba imprescindible comenzar por hallar marcadores informativos, esto es, segmentos de ADN que "señalen" posiciones en un cromosoma. Para nuestra fortuna, el Proyecto Genoma Humano ha generado ya un largo elenco de marcadores que cubren todo el cromosoma X. Los más útiles son unas secuencias breves de ADN repetido que presentan longitudes ligeramente diferentes en personas distintas. Para detectar los marcadores, se recurrió a la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), que permite generar miles de millones de copias de regiones específicas del cromosoma; a continuación, se separaron los diferentes fragmentos por el método de electroforesis en gel.

El segundo paso en el análisis de ligamiento consistió en localizar familias adecuadas. Cuando se estudian caracteres sencillos determinados por un solo gen (como la ceguera a los colores o la anemia falciforme), suelen rastrearse extensas familias, con muchas generaciones, en los que cada miembro porta o no, sin ambigüedad, el rasgo en cuestión. Este tipo de enfoque no sirve para la investigación sobre la orientación sexual. Hay que empezar por identificar la orientación sexual de las personas, lo que no es fácil. Muchos encubren su auténtica inclinación sexual, o no son conscientes de ella. Como en el pasado la homosexualidad constituía un estigma más vergonzante, el rastreo plurigeneracional en una familia se torna más problemático. Además, los modelos genéticos muestran que, para los rasgos determinados por varios genes diferentes que se expresan a varios niveles, el estudio de familias extensas disminuye la probabilidad de encontrar un gen ligado: son demasiadas las excepciones que hay que considerar.

Por esas razones, el equipo de Hamer decidió centrarse en núcleos familiares con dos hijos homosexuales masculinos. En este enfoque, y eso constituye una ventaja, los individuos que se confiesan homosexuales no suelen mentir. Además, permite detectar un único gen ligado, aunque para su expresión se requieran otros genes o factores no hereditarios; así, por ejemplo, en la hipótesis de que, para ser homosexual masculino, se requiera un gen ligado al cromosoma X, otro gen presente en un autosoma y una serie de circunstancias del entorno.

El estudio de los hermanos homosexuales masculinos ha de proporcionar un resultado claro, ya que los dos deben tener el gen del cromosoma X. Por contra, los hermanos heterosexuales de varones homosexuales a veces compartirán el gen del cromosoma X y a veces no, lo que puede provocar confusión en los resultados.

Los analistas genéticos creen que los estudios de hermanos encierran la clave para descubrir los caracteres afectados por muchos elementos. Como Hamer y sus colegas estaban más interesados en encontrar un gen que se expresara sólo en los hombres y se transmitiese a través de las mujeres, restringieron su búsqueda a familias con varones homosexuales, aunque sin pares padre homosexual-hijo homosexual.

Seleccionaron 14 familias con esas características. Prepararon muestras de ADN de los hermanos homosexuales y, cuando fue posible, de sus madres o hermanas. Las muestras se analizaron para 22 marcadores que cubrían todo el cromosoma X, desde el extremo del brazo corto hasta el final del brazo largo.

Para cada marcador, se consideró que un par de hermanos homosexuales era concordante si heredaba de su madre marcadores idénticos; discordante, si heredaban marcadores diferentes. Se esperaba que el 50 por ciento de los marcadores fuesen idénticos por puro azar. Hicieron también correcciones para tomar en cuenta la posibilidad de que la madre portase dos copias del mismo marcador.

Los resultados de este estudio fueron sorprendentes. En la mayor parte del cromosoma X, los marcadores estaban aleatoriamente distribuidos entre hermanos homosexuales. Mas, para un marcador situado en el extremo del brazo largo del cromosoma X, en la región Xq28, había un número elevado de hermanos con-

Arboles genealógicos y cromosoma X

Los árboles genealógicos de la orientación sexual masculina muestran mayores índices de homosexualidad (*marrón oscuro*) en la rama materna. En la paterna dicho índice no supera mucho el 2 % observado para la población general. Este descubrimiento apunta a un posible papel del cromosoma X (*abajo*). Los varones tienen dos cromosomas sexuales, uno Y que heredan del padre, y otro X, que heredan de la madre. Por tanto, un carácter que se herede por vía materna puede estar condicionado por un gen que esté en uno de sus cromosomas X (*en rojo*). De hecho, experimentos ulteriores demostraron que una proporción grande de hermanos varones homosexuales comparten la región Xq28, situada en el extremo del cromosoma X.



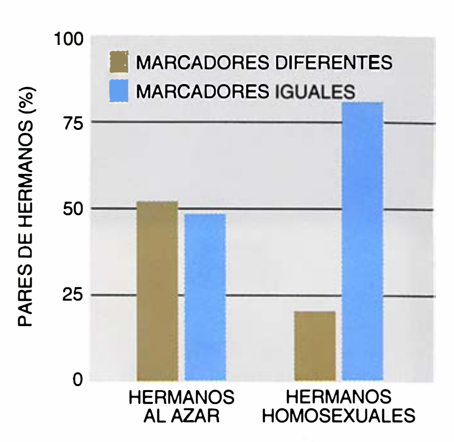
cordantes: 33 pares compartían el mismo marcador, mientras que sólo 7 pares no lo compartían. Pese al discreto tamaño de la muestra, el resultado era estadísticamente significativo, ya que la probabilidad de que dichas proporciones ocurriesen por azar no llegaba a 1 de cada 200. En un grupo control de 314 pares elegidos al azar, la mayoría de los cuales eran presumiblemente heterosexuales, los marcadores Xq28 estaban distribuidos aleatoriamente.

Si nos atenemos a una interpretación directa de estos descubrimientos, la región cromosómica Xq28 contiene un gen que influye en la orientación sexual de los varones. El estudio proporciona la prueba más contundente de que la sexualidad humana está condicionada por la herencia, ya que examina directamente la información genética, el ADN. Pero, igual que ocurría con los primeros estudios, hemos de tomar varias precauciones.

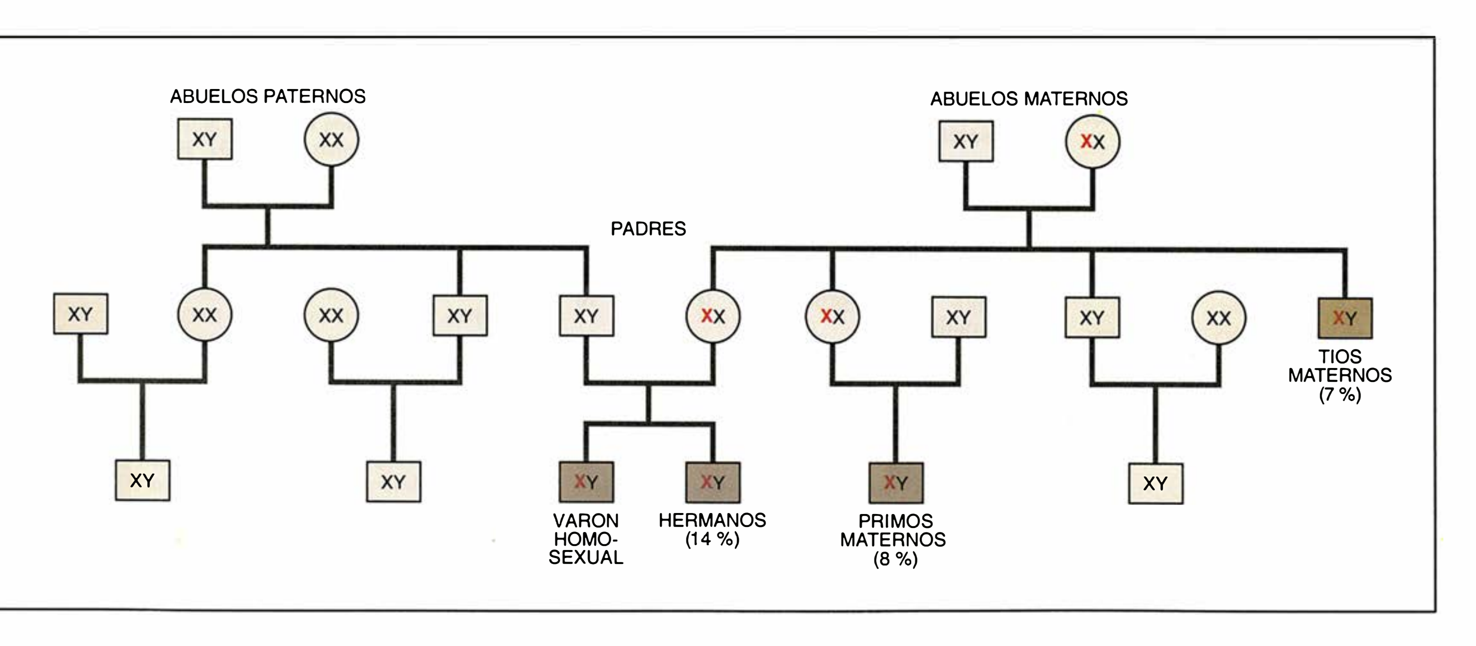
En primer lugar, se exige que el resultado sea repetible. Otros casos en que se habían descubierto genes que parecían estar relacionados con caracteres de la personalidad resultaron a la postre controvertidos. Conviene saber, en segundo lugar, que todavía no se ha aislado el gen. El estudio lo sitúa en una región del cromosoma X que tiene una longitud aproximada de 4 millones de pares de bases. Si bien esa región representa menos del 0,2 % del genoma humano, sigue siendo muy extensa: puede abarcar varios cientos de genes. Para encontrar la aguja en ese pajar habría que trabajar con un gran número de familias o disponer de una información más completa sobre la secuencia de ADN, para identificar todas las regiones susceptibles de cifrar proteínas. Casualmente, la región Xq28 es extraordinariamente rica en loci genéticos, por lo que resulta probable que se trate de una de las primeras regiones del genoma humano que se secuencie en su integridad.

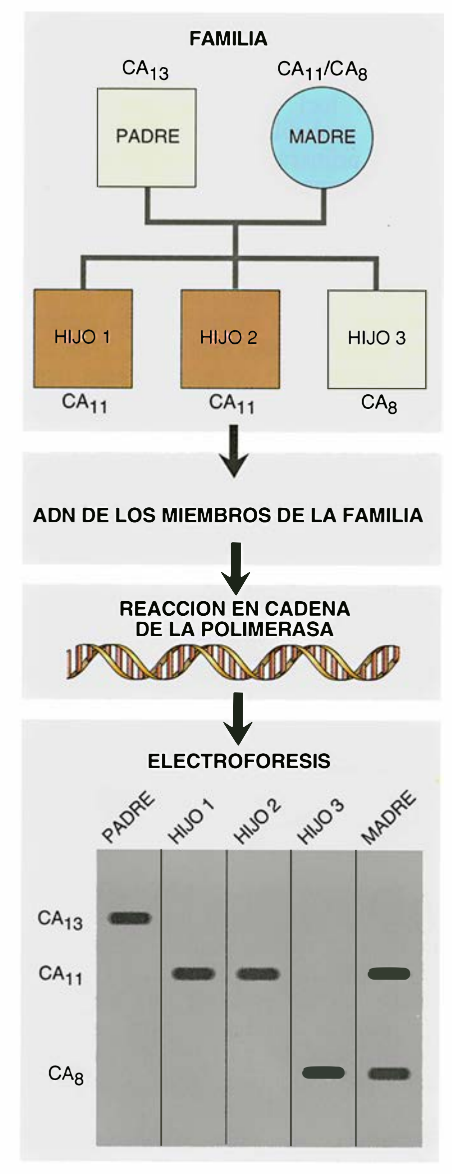
En tercer lugar, desconocemos la importancia cuantitativa del papel de Xq28 en la orientación sexual de los varones. En la población de hermanos homosexuales estudiada, 7 de los 40 hermanos no compartían esos marcadores. Suponiendo que 20 hermanos debían heredar marcadores idénticos por puro azar, cabe estimar que el 36 % de los hermanos homosexuales no presentan ligamiento entre homosexualidad y Xq28. Quizás esos varones heredaron genes distintos, estaban condicionados por factores fisiológicos no genéticos o lo estaban por el entorno. Para el conjunto de varones homosexuales, la mayoría de los cuales sin hermanos homosexuales, la influencia que ejerce Xq28 es incluso menos evidente. También se desconoce el papel de Xq28 y de otros loci genéticos en la inclinación sexual de las mujeres.

¿De qué modo podría afectar a la sexualidad un locus genético de la región Xq28? Cabría que el hipotético gen influyera en la síntesis o metabolismo de una hormona. Un posible candidato para ese gen era el locus del receptor de andrógenos, que cifra una proteína esencial para la masculinización del cerebro humano y se aloja, además, en el cromosoma X. Para comprobar dicha hipótesis, Jeremy Nathans, Jennifer P. Macke, Van L. King y Terry R. Brown, de la Universidad Johns Hopkins, sumaron sus fuerzas a las de Bailey, de la Universidad del Noroeste, y Hamer, Hu y Hu, del Instituto Nacional de la Salud. Compararon la estructura molecular del gen del receptor de andrógenos en 197 varones homosexuales y 213 predominantemente heterosexuales. No encontraron variaciones significativas en sus secuencias. Ni tampoco los estudios de ligamiento hallaron correlación entre homosexualidad en hermanos y herencia del locus del receptor de andrógenos. Y lo más significativo: el locus resultó estar en Xq11, muy distanciado de la región Xq28. Quedó así excluido el receptor de andrógenos entre los fac-



2. COMPARTICION DE GENES de la región Xq28 entre hermanos varones homosexuales, con una frecuencia significativamente mayor que la observada en la población general. De 40 pares de hermanos homosexuales estudiados, 33 pares compartían la región Xq28. En un grupo control de 314 pares de hermanos, seleccionados de forma aleatoria, los marcadores Xq28 se encontraban distribuidos prácticamente al azar.





3. BUSQUEDA DE GENES compartidos en hermanos homosexuales masculinos (*marrón oscuro*). Se requiere primero el aislamiento de ADN de los individuos que hay que analizar. Con la técnica de reacción en cadena de la polimerasa se obtienen varios miles de millones de regiones específicas del cromosoma X, y los fragmentos conseguidos se separan en una electroforesis en gel. Los hermanos homosexuales comparten un marcador de la región Xq28, en este ejemplo hipotético el CA_{11}, con una frecuencia mucho mayor de la esperada del azar.

tores condicionantes de la inclinación sexual de los varones.

Vayamos con la segunda posibilidad: que el hipotético gen actúe indirectamente, a través de la personalidad o el temperamento, y no directamente en la elección del objeto sexual. Dicho de una manera plástica, la gente genéticamente muy segura de sí misma tendrá menos problemas a la hora de manifestar sus inclinaciones hacia el mismo sexo que las personas que dependan de que otros aprueben o le afeen su conducta.

¿Podría, por último, ocurrir que el producto génico de Xq28 ejerciera una acción directa sobre el desarrollo de regiones del cerebro sexualmente dimórficas, como la NIHA3? En su versión elemental, tal agente podría actuar autónomamente, quizás en el útero, estimulando la supervivencia de neuronas específicas de varones preheterosexuales, o promoviendo su destrucción en varones prehomosexuales y mujeres. En un modelo más complejo, el producto génico podría cambiar el grado de sensibilidad de un circuito neuronal del hipotálamo a ciertos estímulos ambientales, tal vez en los primeros años de vida. De acontecer eso, los genes servirían para predisponer, más que para predeterminar. Queda por ver si todo esto tiene algo de verosímil. Lo cierto es que se puede comprobar experimentalmente, utilizando las herramientas actuales de la genética y neurobiología molecular.

Nuestras investigaciones han despertado el interés de la opinión pública, no porque suponga un desafío conceptual —la idea de que genes y cerebro estén implicados en el comportamiento humano no es nueva—, sino porque viene a poner el dedo en la llaga de un conflicto profundo en la sociedad. Pensamos que la investigación científica puede ayudar a disipar algunos de los mitos sobre la homosexualidad, que en el pasado han oscurecido la imagen de los hombres y las mujeres con esta inclinación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A DIFFERENCE IN HYPOTHALAMIC STRUCTURE BETWEEN HETEROSEXUAL AND HOMOSEXUAL MEN. Simon LeVay en *Science*, volumen 253, páginas 1034-1037, 30 de agosto de 1991.

A LINKAGE BETWEEN DNA MARKERS ON THE X CHROMOSOME AND MALE SEXUAL ORIENTATION. Dean H. Hamer, Stella Hu, Victoria L. Magnuson, Nan Hu y Angela M. L. Pattatucci en *Science*, vol. 261, páginas 321-327, 17 de julio de 1993.

SEQUENCE VARIATION IN THE ANDROGEN RECEPTOR GENE IS NOT A COMMON DETERMINANT OF MALE SEXUAL ORIENTATION. Jennifer P. Macke, Nan Hu, Stella Hu, J. Michael Bailey, Van L. King, Terry R. Brown, Dean H. Hamer y Jeremy Nathans en *American Journal of Human Genetics*, vol. 53, n.º 4, páginas 844-852, octubre de 1993.

THE SEXUAL BRAIN. Simon LeVay. MIT Press, 1993.

¿Una determinación biológica?

Aun cuando los rasgos genéticos y neuroanatómicos guardaran cierta correspondencia con la orientación sexual de los individuos, no está en absoluto probada la relación de causalidad entre aquéllos y ésta

William Byne

Los defensores de los derechos humanos, las organizaciones religiosas y los tres poderes, de los Estados Unidos y otras naciones, debaten si la orientación sexual de las personas tiene base biológica. Esta polémica ha acaparado titulares en los periódicos, pero los expertos en comportamiento la consideran agua pasada. La pregunta fundamental sobre biología e inclinación sexual no es si la primera está involucrada en la segunda, sino la forma en que lo está. En última instancia, todos los fenómenos psicológicos son biológicos.

Pero aunque el debate público apareciera formulado en términos más precisos, seguiría desenfocado. Casi ninguno de los pasos de la argumentación que ligan la biología con la orientación sexual y la política social resisten el análisis. En el ámbito político, no deja de ser un criterio inhumano el que una sociedad exija la condición de inmutabilidad o de característica innata para determinado rasgo, a la hora de decidir quiénes merecen o no su tolerancia. Aun cuando la homosexualidad fuera mera cuestión opcional, los empeños por erradicarla mediante el uso de sanciones sociales y penales recortan las libertades fundamentales y la diversidad del género humano.

Además, la idea de que la homosexualidad o es innata e inmutable o, por el contrario, de opción libre, resulta, a su vez, inexacta. Fijémonos en el chingolo cejiblanco, pájaro que aprende el canto de su especie a lo largo de un corto intervalo en su desarrollo. La mayoría de los gorriones expuestos a diversos trinos, entre ellos el de su especie, aprenden este último, pero algunos no lo hacen. En cuanto el pájaro ha aprendido un canto determinado, ni lo olvida ni adquiere otro nuevo. Aunque la inclinación sexual no constituya una cuestión de mimetismo, a la manera de nuestra ave, es obvio que la conducta aprendida sí puede perdurar inmutable.

Por último, todas las pruebas presentadas hasta la fecha en pro de una base biológica, congénita, de la homosexualidad adolecen de puntos débiles. Las de corte genético se resienten de la inevitable confusión entre lo natural y lo adquirido que arruina los trabajos relativos a la herencia de los rasgos psicológicos. Las pruebas extraídas de estudios sobre el cerebro descansan en dudosas hipótesis que sostienen la existencia de diferencias entre el cerebro de varón y el de mujer. Los mecanismos biológicos que se han propuesto para explicar la homosexualidad masculina no pueden, por lo común, generalizarse para dar cuenta de la homosexualidad femenina (muy poco atendida en las investigaciones). Y la propia naturaleza de gradación continua de las variables biológicas está reñida con la escasez de adultos bisexuales sugerida en la mayoría de los estudios.

Para saber cómo influyen los factores biológicos en la orientación sexual, hay que empezar por definir qué se entiende por ésta. Muchos investigadores, Simon LeVay en particular, consideran dicha inclinación un rasgo sexualmente dimórfico: los varones están normalmente "programados" para sentir atracción por las mujeres, y las mujeres lo están en general para verse atraídas por los hombres. A tenor de este planteamiento, los varones homosexuales tendrían programación femenina y las lesbianas, masculina. Algunos estudiosos sugieren que esta programación corre a cargo de factores biológicos, que la realizarían durante la gestación; otros creen que ocurre después de nacer, en respuesta a estímulos sociales y experiencias subjetivas. Puesto que la función del cerebro se halla vinculada a su estructura y fisiología, sería lógico suponer que los cerebros de los homosexuales exhibieran características propias del sexo contrario.

La validez de este cuadro "intersexual" es cuestionable. Por un lado, la orientación sexual no es dimórfica, sino polimórfica. Las motivaciones conscientes e inconscientes asociadas con la atracción sexual divergen incluso entre personas del mismo sexo e inclinación. Son innumerables las experiencias (e interpretaciones subjetivas de esas experiencias) que pueden intervenir para que personas diferentes sientan el mismo grado relativo de atracción sexual hacia hombres o hacia mujeres. Personas distintas pueden tener razones diferentes para sentirse sexualmente atraídas por varones; a priori, no hay motivo alguno para que todos los que experimentan atracción sexual hacia el varón compartan alguna estructura cerebral concreta.

La idea de que los varones homosexuales están feminizados y las lesbianas masculinizadas refleja más nuestra cultura que la biología de la respuesta erótica. Ciertos mitos griegos reclamaban orígenes intersexuales para el deseo heterosexual, no para el homosexual: las personas atraídas por otras de su mismo sexo se consideraban las más viriles entre los hombres y las más femeninas entre las mujeres. Por contra, se atribuía una naturaleza mixta, masculina y femenina, a los que deseaban al sexo opuesto. La cultura clásica encomiaba las manifestaciones homose-

WILLIAM BYNE estudia la incidencia de los factores biológicos y sociales en la conducta. Se halla adscrito a la facultad de medicina Albert Einstein de la Universidad Yeshiva de Nueva York, donde investiga la estructura cerebral de los humanos y otros primates. También ejerce como psiquiatra en el Instituto de Psiquiatría de Nueva York. En 1985 se doctoró en neurología por la Universidad de Wisconsin en Madison.

xuales de héroes arquetípicamente masculinos, como Zeus, Hércules y Julio César. Hasta hace diez años (cuando los misioneros repudiaron tal práctica), entre los miembros del pueblo sambia de Nueva Guinea regía la costumbre según la cual los adolescentes realizaban prácticas sexuales con los hombres, felación incluida; nadie consideraba afeminado ese comportamiento. Antes bien, creían necesaria la ingestión de semen para alcanzar fuerza y virilidad.

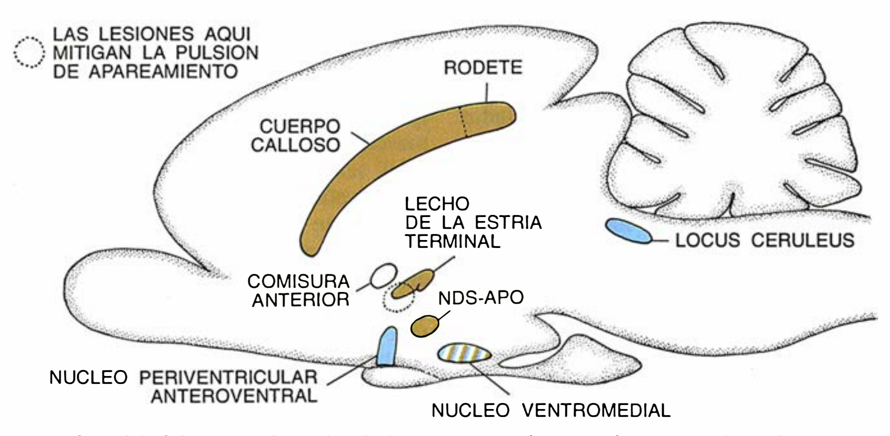
El cuadro intersexual ha de habérselas, sin embargo, con un problema más tangible: no se ha conseguido una demostración concluyente de que los rasgos de los cuales los homosexuales tienen claras versiones correspondientes al sexo opuesto difieran entre hombres y mujeres. De las múltiples diferencias que, en razón del sexo, se atribuían en el siglo pasado al cerebro, sólo una puede corroborarse: el tamaño, que varía con el tamaño corporal. Así, los varones tienden a tener cerebros ligeramente mayores que las mujeres. Esta situación contrasta de forma notable con lo observado en otros animales, que sí reflejan rasgos dispares en el cerebro según el sexo.

Si el cerebro presenta ya un sistema de conexiones o cualquier otro tipo de programación concerniente a la inclinación sexual, ¿qué fuerzas son las responsables? Hay tres posibilidades. De acuerdo con un primer modelo, se daría una relación biológica causal y directa; genes, hormonas u otros factores actuarían directamente sobre el cerebro en desarrollo,



Mas una vez que fue separada la naturaleza humana en dos, añorando cada parte su propia mitad, se reunía con ella. Se rodeaban con sus brazos, se enlazaban entre sí, deseosos de unirse de nuevo en una sola naturaleza. —Platón, Banquete

a buen seguro antes del nacimiento, para determinar la orientación sexual. Para un modelo alternativo, el del aprendizaje social, la biología proporcionaría una pizarra en blanco de circuitos neuronales sobre la cual la experiencia inscribiría la inclinación sexual. Por último, según el modelo indirecto, los factores biológicos no condicionarían la orientación del cerebro; se limitarían a predisponer hacia ciertos rasgos de personalidad, que influyen en las relaciones y experiencias, las cuales, en último término, conformarían la sexualidad.



1. NUCLEOS CON DIMORFISMO SEXUAL del área preóptica (NDS-APO) del cerebro de rata: se trata de regiones cuyo tamaño varía de los machos a las hembras. Los intentos de localizar un grupo celular análogo en el cerebro humano arrojan diferentes resultados. La existencia de algunos de estos núcleos no se ha confirmado en otros roedores. Las regiones que son mayores en los machos están sombreadas en marrón y las mayores en las hembras lo están en azul.

Durante los últimos decenios, la especulación en torno a la biología y la orientación solía centrarse en el papel de las hormonas. Llegó a afirmarse que los niveles de andrógenos y estrógenos determinaban la orientación sexual del adulto, hipótesis que se desvaneció por falta de pruebas. Y pasó a suponerse que las hormonas determinaban la orientación sexual del cerebro durante el período prenatal.

Según esta postrera hipótesis, unos altos niveles prenatales de andrógenos durante una época decisiva producirían heterosexualidad en los hombres y homosexualidad en las mujeres. A la inversa, bajos niveles fetales de andrógenos provocarían homosexualidad en los varones y heterosexualidad en las mujeres. Esta hipótesis descansa, sobre todo, en estudios realizados en roedores. Se ha observado que la exposición precoz a hormonas determina la opción entre los patrones masculinos y los femeninos de la conducta de apareamiento exhibida por los animales adultos. Las hembras de roedores que fueron expuestas a andrógenos al principio de su desarrollo muestran una conducta de apareamiento masculinizante con mayor frecuencia que las hembras adultas normales. Los machos privados, por castración, de andrógenos durante el mismo período crítico adoptan una postura femenina de apareamiento denominada lordosis (arqueo del lomo) cuando son cubiertos.

Muchos especialistas consideran homosexuales a estas últimas ratas macho (igual que a la rata hembra que monta a otras); la lordosis, sin embargo, es poco más que un reflejo: la rata macho adoptará la misma postura al rozarle el lomo. Consideran heterosexual al macho que monta a otro macho y a la hembra que exhibe lordosis en la cubrición por otra hembra. La aplicación de este razonamiento a los seres humanos implicaría que, de dos individuos del mismo sexo que mantienen relaciones sexuales, sólo uno es homosexual; cuál de ellos lo sea dependerá del rol o postura que adopte.

Además de establecer las pautas de apareamiento, la exposición precoz a andrógenos determina si el cerebro de un animal va a poder regular la función ovárica normal. El cerebro de una rata macho no puede responder a los estrógenos desencadenando una retroalimentación positiva, cadena de acontecimientos que culmina en el aumento brusco de la hormona luteinizante en el torrente sanguíneo, la cual a su vez inicia la ovulación. A partir de ese fenómeno, ciertos investigadores dedujeron que los varones homosexuales (cuyos cerebros, alegan, están insuficientemente masculinizados) podrían tener una reacción de retroalimentación positiva más fuerte que los heterosexuales.

Aunque dos laboratorios corroboraron tal inferencia, la refutaron otros trabajos cuidadosamente diseñados y ejecutados, en particular el realizado por Luis J. G. Gooren, de la Universidad Libre de Amsterdam. Agréguese, además, que los mecanismos de retroalimentación son irrelevantes para la orientación sexual humana: se ha demostrado que el mecanismo de retroalimentación positiva no constituye ningún rasgo sexualmente dimórfico en los primates, humanos incluidos. Por tanto, si se trata de un fenómeno que no discrimina entre varones y mujeres, carece de sentido sugerir que está "feminizado" en los varones homosexuales.

De la hipótesis de feminización de las respuestas a la hormona luteinizante en los varones homosexuales se sigue este corolario: las respuestas deberían estar "masculinizadas" en las mujeres lesbianas. De ocurrir tal, las mujeres homosexuales ni menstruarían, ni tendrían hijos. La abrumadora proporción de lesbianas con ciclos menstruales normales y el creciente número de madres declaradamente homosexuales ponen al descubierto la inconsistencia de esa idea.

INVESTIGADORES	REGION DEL CEREBRO			
	NIHA1	NIHA2	NIHA3	NIHA4
Swaab y Fliers, 1985	Mayor en los varones	Sin estudiar	Sin estudiar	Sin estudiar
Allen *et al.*, 1989	Sin diferencia sexual	Mayor en los varones que en las mujeres	Mayor en los varones	Sin diferencia sexual
LeVay, 1991	Sin diferencia sexual	Sin diferencia sexual	Mayor en varones heterosexuales que en varones homosexuales o en mujeres	Sin diferencia sexual

2. NUCLEOS HIPOTALAMICOS a los que se ha atribuido dimorfismo sexual en los seres humanos. Ello no obstante, cualquier afirmación sobre su incidencia en la orientación sexual de los individuos es apresurada, toda vez que no se ha demostrado de forma concluyente que existan diferencias en estas regiones entre hombres y mujeres.

Si la hipótesis hormonal prenatal fuera correcta, cabría esperar que fuera homosexual el número enorme de varones con afecciones asociadas a una deficiencia androgénica prenatal, y que lo fueran también las mujeres expuestas a un exceso de andrógenos antes del nacimiento. Ni una cosa ni otra son verdad.

Puesto que los andrógenos son necesarios para el desarrollo de los genitales externos normales en los varones, es posible que el sexo de los individuos afectados no se manifieste con claridad al nacer: varones con genitales de aspecto femenino y mujeres con genitales de apariencia masculina. En estos casos se recurre a la cirugía plástica para la construcción de genitales acordes al sexo real; la decisión de educarlos como niños o como niñas no se basa a veces en el sexo genético, sino en las posibilidades de reconstrucción genital.

Cuando la investigación sobre la inclinación sexual se centra en esos individuos, tiende a respaldar el modelo de aprendizaje social. Con independencia de su sexo genético o de la naturaleza de la exposición hormonal prenatal, los sujetos se convierten en heterosexuales con respecto al sexo en que les han educado sus padres, siempre que su asignación se haya realizado sin ambigüedad antes de los tres años de edad.

No obstante, algunos trabajos recogen un aumento de las fantasías o conductas homosexuales de mujeres que estuvieron expuestas a andrógenos durante el período fetal. De acuerdo con la hipótesis de los efectos biológicos directos, esas observaciones constituirían una prueba de que la exposición prenatal a andrógenos trenza las conexiones cerebrales que determinan la atracción sexual hacia las mujeres.

Ruth H. Bleier, neurobióloga y estudiosa feminista, ha propuesto una interpretación alternativa. No se trata de que esas tendencias homosexuales reflejen el efecto de las hormonas masculinizantes sobre la diferenciación sexual del cerebro; por contra, las adaptaciones de las mujeres prenatalmente masculinizadas reflejan a buen seguro el impacto de haber nacido con genitales masculinizados o reflejan el conocimiento de haber estado expuestas a niveles aberrantes de hormonas sexuales durante el desarrollo. "El género al que se pertenece sería una construcción frágil y arbitraria", concluye Bleier, "si dependiera de la cirugía plástica".

Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard, ha escrito sobre el descrédito en que cayó, ante los anatomistas del siglo pasado, la búsqueda en el cerebro de diferencias relacionadas con el sexo y otras categorías sociales; andaban ellos mismos confundidos al pensar que las medidas cerebrales justificaban los prejuicios sociales de su época. La búsqueda cerebral de diferencias relacionadas con el sexo tornó a tomar auge en las postrimerías de los años setenta, cuando el equipo de Roger A. Gorski, de la Universidad de California en Los Angeles, descubrió que cierto grupo de células situadas en la región preóptica del hipotálamo de rata era mucho mayor en los machos que en las hembras. A este grupo celular lo denominaron núcleo con dimorfismo sexual (NDS) del área preóptica (APO). Desde hacía tiempo se venía implicando el área preóptica en la regulación de la conducta sexual.

Como ocurría con las diferencias, asociadas al sexo, observadas en la conducta de apareamiento y en los mecanismos reguladores de la hormona luteinizante, se encontró que la disparidad de tamaño del NDS-APO obedecía a una distinta exposición a andrógenos en las primeras etapas del desarrollo. Poco después, Bleier y el autor, trabajando en la Universidad de Wisconsin en Madison, examinaron el hipotálamo de varias especies de roedores; vimos que el NDS-APO es sólo parte de un dimorfismo sexual que abarca a otros varios núcleos hipotalámicos.

Tres laboratorios han buscado núcleos con dimorfismo sexual en el hipotálamo humano. Laura S. Allen identificó, en el laboratorio de Gorski, cuatro posibles candidatos, homólogos potenciales del NDS-APO de rata; los denominó núcleos intersticiales del hipotálamo anterior (NIHA1-NIHA4). Otros equipos que han medido también estos núcleos, han obtenido, sin embargo, resultados contradictorios: el grupo de Dick Swaab, del Instituto holandés de investigación del cerebro en Amsterdam, encontró que el NIHA1 era mayor en los hombres que en las mujeres, en tanto que Allen no halló diferencia alguna en ese núcleo, pero observó que el NIHA2 y el NIHA3 eran mayores en los varones.

Más recientemente, LeVay no descubrió diferencias, acordes con el sexo, ni en el NIHA1 ni en el NIHA2, pero corroboró los hallazgos de Allen acerca de un tamaño mayor del NIHA3 en los varones. LeVay publicó también que, en homosexuales masculinos, el NIHA3 tiende a ser menor, semejante al de las mujeres. (Con Clifford Saper, de Harvard, estoy midiendo núcleos intersticiales, pero no hemos conseguido todavía resultados definitivos.)

Se ha visto en el estudio de LeVay una sólida prueba de la intervención directa de los factores biológicos sobre las conexiones cerebrales que determinan la orientación sexual. No me parece a mí tan segura la conclusión. Por varias razones. En primer lugar, su trabajo ni se ha repetido ni cabe esperar que pueda

Exposición a hormonas y conducta de apareamiento en ratas

La exposición de las ratas a hormonas durante la gestación afecta a su conducta de apareamiento. Los machos expuestos a insuficiente cantidad de andrógenos adoptan posturas típicamente femeninas, mientras que las hembras que reciben un exceso de dichas sustancias se empeñan en comportamientos masculinos. La extrapolación de estos datos a la orientación sexual de los humanos resulta, cuando menos, difícil.

MACHO CUBRE A HEMBRA
La rata macho se considera heterosexual
La rata hembra se considera heterosexual



HEMBRA CUBRE A HEMBRA
La hembra superior se considera homosexual
La hembra inferior se considera heterosexual



MACHO CUBRE A MACHO
El macho superior se considera heterosexual
El macho inferior se considera homosexual



HEMBRA CUBRE A MACHO
La rata hembra se consideraría homosexual
La rata macho se consideraría homosexual

(No se ha estudiado experimentalmente)

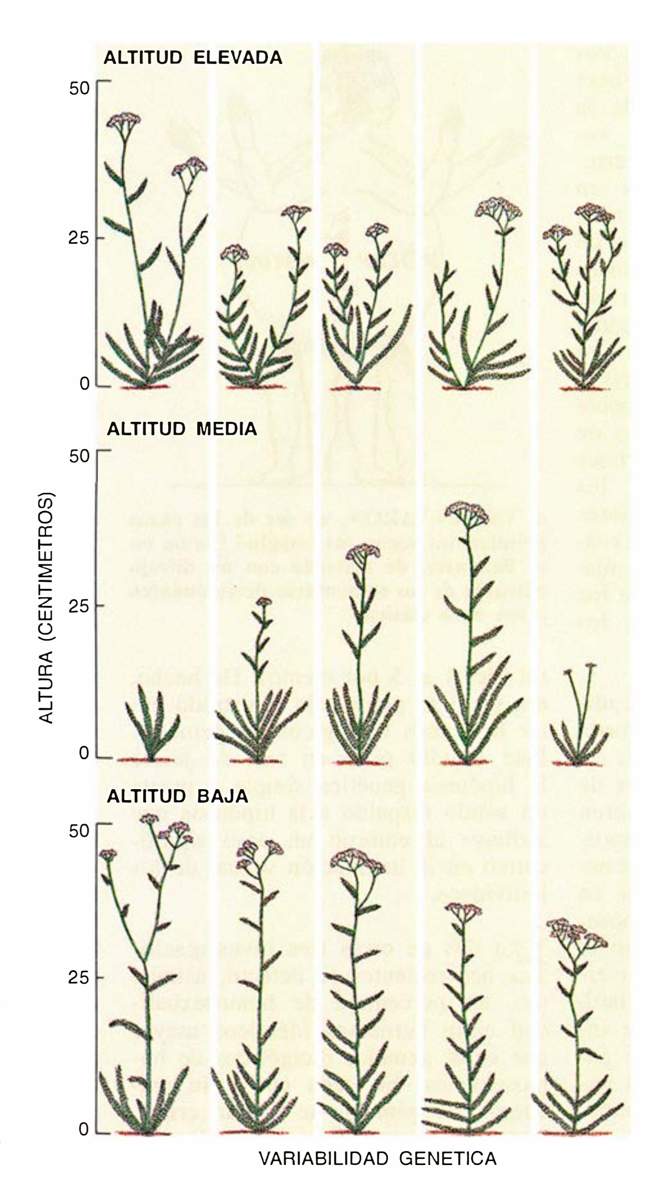
fácilmente reproducirse, habida cuenta de la naturaleza de estos estudios neuroanatómicos que no suelen disponer de un registro de pautas. Y, de hecho, líneas de trabajo similares a las seguidas por LeVay en su identificación de los núcleos terminaron en callejones sin salida.

Manfred Gahr, ahora en el Instituto Max Planck de Fisiología Animal en Seewiesen, utilizó una técnica de tinción celular similar a la empleada por LeVay para observar lo que parecían variaciones estacionales en el tamaño de un núcleo involucrado en el canto de los canarios. Dos métodos de tinción más específicos revelaron, sin embargo, que el tamaño del núcleo no cambiaba. Gahr sugirió que el método menos específico podría haberse visto condicionado por variaciones hormonales estacionales que alteraron las propiedades de las células del núcleo.

Además, en el estudio de LeVay, todos los cerebros de varones homosexuales pertenecían a sidosos. La inclusión de unos cuantos sidosos heterosexuales no basta para comprobar, de manera fehaciente, si la caída de los niveles de testosterona que experimentan casi todos los sidosos en los momentos finales de su vida resulta de la propia enfermedad o de los efectos colaterales de determinados tratamientos. LeVay sólo ha examinado el cerebro de un homosexual masculino que no murió de sida. Cabe, pues, que los efectos sobre el tamaño del NIHA3 que él atribuía a la orientación sexual se deban a trastornos hormonales asociados con el sida. El trabajo de Deborah Commins y Pauline I. Yahr, de la Universidad de California en Irvine, respalda esta hipótesis: hallaron que el tamaño de una estructura equiparable al NIHA3 en jerbillos mongoles variaba con la cantidad de testosterona presente en el torrente sanguíneo.

Por último, el estudio de LeVay se basa en un análisis impreciso de la investigación animal pertinente. Ha sugerido que el NIHA3, como el NDS-APO en la rata, está situado en una región hipotalámica que se sabe interviene en la pulsión sexual masculina. Ahora bien, las investigaciones realizadas en diversas especies coinciden en indicar que la región hipotalámica involucrada en la conducta sexual masculina no es la misma que ocupan tales núcleos. Gorsky y Gary W. Arendash, este último hoy en la Universidad del Sur de Florida, hallaron que la destrucción bilateral de los NDS-APO del cerebro de rata macho no afectaba al comportamiento sexual.

Poco antes de mi incorporación en el grupo de Robert W. Goy, del Centro Regional de Investigación Primatológica de Wisconsin, Jefferson C. Slimp acometió varios experimentos cuyos resultados sugerían que, en el mono rhesus, la región implicada en el comportamiento sexual de los machos se hallaba por encima del área equivalente a la ocupada por el NIHA3 en el cerebro humano. Los machos con lesiones en esa región cubrían a las hembras con menor frecuencia que antes de ser operados, pero no varió su frecuencia de masturbación. Aunque algunos han interpretado estos resultados en el sentido de que las lesiones disminuían selectivamente el impulso heterosexual, tal conclusión carece de fundamento; después de la operación, los machos accionaban la palanca que les permitía el acceso a las hembras más a menudo que antes. Por desgracia, estos machos no tuvieron oportunidad de relacionarse con otros machos, por lo que el estudio no nos aporta nada sobre la motivación o la conducta homosexual en contraposición a la heterosexual.

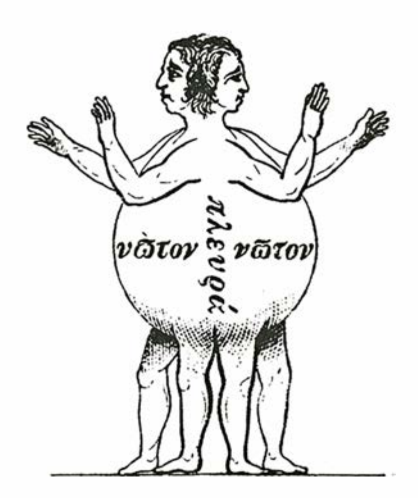


3. ESQUEJES de *Achillea*. Tienen la misma dotación genética, pero se desarrollan de forma distinta según el entorno. Además, saber cómo se diferencian las cinco variedades genéticas en un medio no ayuda a predecir sus características en otro. El que las plantas muestren una respuesta tan compleja al medio pone de manifiesto lo ilógico de esperar vínculos directos y predecibles entre los genes humanos y un rasgo tan vago como la orientación sexual.

Los núcleos hipotalámicos intersticiales no son las únicas partes del cerebro sometidas a investigación para ahondar en la inclinación sexual. La neuroanatomía ha sacado a la luz ciertas diferencias, de potencial interés, en regiones que no habían sido involucradas directamente en la conducta sexual. Swaab y Michel A. Hofman encontraron que otro núcleo hipotalámico, el supraquiasmático, era mayor en los varones homosexuales que en los heterosexuales. Pero el tamaño de esta estructura no varía en razón del sexo, y aun en el caso de que los resultados de esta investigación se confirmaran, no apoyarían el supuesto de que el cerebro de los homosexuales tiene rasgos intersexuados.

Allen, de UCLA, ha puesto de manifiesto que la comisura anterior, una estructura que participa en la transferencia de información de un hemisferio cerebral a otro, es mayor en las mujeres que en los varones. Llegó a la conclusión de que, en los homosexuales masculinos, la comisura anterior está feminizada; es decir, es

mayor que en los heterosexuales. Por su parte, Steven Demeter, Robert W. Doty y James L. Ringo, de la Universidad de Rochester, han encontrado exactamente lo contrario: comisuras anteriores mayores en hombres que en mujeres. Además, aun suponiendo que los resultados de Allen fueran los correctos, el mero tamaño de la comisura anterior no permitiría sacar conclusión alguna sobre la inclinación sexual de una persona. Además, si bien ella descubrió una diferencia estadísticamente significativa en el tamaño medio de la comisura anterior entre varones homosexuales y heterosexuales, los tamaños de las comisuras anteriores de 27 de los 30 hombres homosexuales de su estudio pertenecían al mismo intervalo de tamaño que el de los 30 hombres heterosexuales con los que los comparó.



4. VARON-VARON, un ser de las razas primigenias según las imaginó Platón en el *Banquete*, de acuerdo con un dibujo extraído de un comentario decimonónico a esa obra clásica.

Algunos investigadores han acudido a la genética en su búsqueda de un vínculo biológico para la orientación sexual. Los resultados de varios estudios recientes sugieren una mayor probabilidad de comportamiento homosexual en los hermanos de varones homosexuales que en los varones sin hermanos homosexuales. De estos trabajos, sólo en el de J. Michael Bailey, de la Universidad Noroeste, y Richard C. Pillard, de la Universidad de Boston, se incluyeron hermanos biológicos no gemelos y hermanos adoptados (sin parentesco biológico), además de gemelos idénticos y dicigóticos.

La investigación de tales autores produjo resultados paradójicos. Unas estadísticas apoyan la hipótesis genética, mientras que otras la refutan. Los gemelos monocigóticos presentaban la mayor probabilidad de ser homosexuales los dos; al 52 por ciento, frente al 22 por ciento de los gemelos dicigóticos, les unía la homosexualidad. Este resultado respaldaría la interpretación genética, ya que los gemelos idénticos comparten toda la dotación hereditaria, mientras que los gemelos dicigóticos comparten sólo la mitad. Los hermanos no gemelos de homosexuales comparten la misma proporción de genes que los gemelos dicigóticos. Sin embargo, sólo el 9 por ciento de ellos tendían también a la homosexualidad. La hipótesis genética predice que la proporción sería la misma.

Bailey y Pillard observaron, además, que la incidencia de homosexualidad en los hermanos adoptados de homosexuales (11 por ciento) era mucho mayor que la calculada recientemente para la población general (del 1 al 5 por ciento). De hecho, era igual al porcentaje registrado entre hermanos biológicos no gemelos. Este estudio pone en tela de juicio la hipótesis genética simple y presta un sólido respaldo a la hipótesis que atribuye al entorno un peso significativo en la inclinación sexual de los individuos.

En dos de otras tres investigaciones recientes se detectó, asimismo, un porcentaje de homosexualidad entre hermanos idénticos mayor que entre gemelos dicigóticos de homosexuales. En cada caso, sin embargo, los gemelos se habían criado juntos. Sin conocer qué experiencias del desarrollo contribuyen a la orientación sexual y si dichas experiencias son más parecidas entre gemelos idénticos que entre gemelos dicigóticos, se hace difícil separar los efectos de una dotación genética común de los de una educación común. La resolución de esta cuestión pasa por estudiar gemelos criados por separado.

Con todo, el principal hallazgo de estos estudios de heredabilidad quizá resida en el hecho siguiente: pese a compartir los mismos genes y haber vivido un ambiente perinatal lo más parecido posible, aproximadamente la mitad de los gemelos idénticos mostraban una orientación sexual distinta. El dato viene a subrayar cuán poco sabemos acerca de los orígenes de la inclinación sexual.

Debemos al equipo de Dean H. Hamer, del Instituto Nacional de la Salud, la prueba más directa de la base genética de la orientación sexual. El grupo concentró su atención en la región Xq28 del cromosoma X; ese segmento contiene cientos de genes. Las mujeres poseen dos cromosomas X y, por tanto, dos regiones Xq28, pero sólo transfieren la copia de una de ellas a sus hijos (que portan un solo cromosoma X). La probabilidad teórica de que dos hijos reciban una copia de la misma región Xq28 es del 50 por ciento. Hamer encontró que, de sus 40 pares de hermanos homosexuales masculinos, 33, y no 20 como se esperaba, habían recibido la misma región Xq28 de sus madres.

Suele caerse en una interpretación errónea del hallazgo de Hamer y afirmar que demuestra que los 66 varones que integraban los 33 pares compartían la misma secuencia Xq28. La verdad es que el trabajo demuestra algo muy distinto; a saber: que cada miembro de los 33 pares concordantes comparte su región Xq28 sólo con su hermano, no con cualquiera de los otros 32 pares. No se identificó ninguna secuencia exclusiva y específica (un supuesto "gen homosexual") en los 66 varones.

Por desgracia, el equipo de Hamer no examinó la región Xq28 de los hermanos heterosexuales de los individuos homosexuales para ver cuántos compartían la misma secuencia. Hamer sugiere que la inclusión de hermanos heterosexuales habría confundido su análisis porque el gen asociado con la homosexualidad podría tener una "penetración incompleta"; esto es, que los varones heterosexuales fueran portadores del gen sin expresarlo. En otras palabras, la inclusión de hermanos heterosexuales hubiera revelado tal vez que la responsabilidad de la orientación sexual recae en algo más que en los genes.

Por último, Neil J. Risch, de la Universidad de Yale, uno de los que han desarrollado las técnicas estadísticas empleadas por Hamer, ha cuestionado la significación estadística de los resultados de éste. Según Risch, hasta no disponer de más detalles sobre el agrupamiento ("clustering") familiar de la homosexualidad, las implicaciones de estudios como el de Hamer siguen siendo poco claras.

Los trabajos que conceden categoría de rasgo hereditario a la homosexualidad (admitido que puedan repetirse) no indican nada sobre el modo en que operaría tal heredabilidad. Los genes, de suyo, especifican proteínas, no fenómenos conductuales ni psicológicos. Aunque apenas sabemos nada sobre cómo materializa el cerebro los complejos fenómenos psicológicos, entra dentro de lo razonable que haya secuencias de ADN

capaces de establecer conexiones cerebrales específicas de una orientación homosexual. Pero no deja de resultar significativo que la transmisión de caracteres hereditarios no necesite de tales mecanismos.

En cambio, determinados genes podrían influir en rasgos de la personalidad que, a su vez, condicionaran las relaciones y las experiencias subjetivas que contribuyen al aprendizaje social de la orientación sexual. Podemos imaginarnos muchas formas mediante las cuales una diferencia de temperamento originaría orientaciones diferentes en ambientes distintos.

A modo de analogía veamos qué acontece con *Achillea*. En esta planta, las variaciones genéticas producen fenotipos dispares en función de la altitud. La altitud a la que crece un esqueje no tiene un efecto lineal sobre su crecimiento, ni este efecto se limita a un solo atributo. También se ven afectados la talla, el número de hojas y tallos, amén del patrón de ramificación. Si una planta despliega una respuesta tan variopinta ante los cambios del medio, ¿qué no podrá hacer un organismo mucho más complejo, capaz de modificar a voluntad su entorno?

Hemos de limitarnos a un esbozo muy sumario de la posible interacción entre genes y ambiente para la conformación de la orientación sexual. Muchos investigadores sostienen que la aversión de los niños a los juegos violentos advierte ya, hasta cierto punto, de un desarrollo homosexual. (Para los partidarios del modelo directo esta aversión constituye una palmaria expresión infantil de un cerebro determinado hacia la homosexualidad.) Por su parte, los psicoanalistas han observado que, entre los varones homosexuales que asisten a sesiones de terapia, muchos recuerdan haber mantenido escaso trato con su padre. Sugieren que una relación paterno-filial deteriorada conduce a la homosexualidad.

Se podrían combinar ambas observaciones e inferir que una aversión genéticamente determinada hacia los juegos violentos en los niños arruina el entendimiento con el padre, que exige de ellos una adhesión a los rígidos estereotipos del papel de cada sexo. El padre que no se atiene a estos cánones mantendría una buena relación con sus hijos. Por consiguiente, el hipotético gen afectaría a la orientación sexual en algunos casos, pero no en otros. Incluso un ejemplo tan reduccionista (basado en rasgos que reflejan estereotipos culturales más que biológicos) muestra cómo ni temperamento ni ambiente familiar serían decisivos. Los estudios centrados en uno u otro darían resultados cuestionables.

Estas inferencias especulativas remachan la necesidad de avanzar mucho más para poder desentrañar los factores, biológicos o fruto de la experiencia vivida, que intervienen en la orientación sexual. Aun cuando resultara cierto que el tamaño de ciertas estructuras cerebrales guarda relación con la inclinación sexual de cada sujeto, nuestro conocimiento del cerebro es todavía insuficiente para explicar cómo tales diferencias cuantitativas generarían diferencias cualitativas en un fenómeno psicológico tan complejo como el de la orientación sexual. De igual manera, la confirmación de los hallazgos genéticos que pretenden demostrar que la homosexualidad es hereditaria no aclara qué es lo que se hereda ni cómo influye en la orientación sexual. En el futuro previsible, por tanto, la interpretación de estos resultados seguirá girando en torno a suposiciones de validez cuestionable.

Mientras continúan los esfuerzos por repetir tales hallazgos provisionales, hemos de resistir la tentación de tomarlos por algo más que meras aproximaciones. Y quizá lo más importante, debemos preguntarnos por qué nos sentimos todos tan visceralmente involucrados en esta investigación. ¿Influirá en la postura adoptada cómo nos percibimos a nosotros o a los demás, cómo vivimos nuestras propias vidas y dejamos que los demás vivan las suyas? Tal vez las respuestas a las preguntas más acuciantes de este debate no residan tanto en la biología del cerebro cuanto en las culturas que los cerebros han creado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NOT IN OUR GENES: BIOLOGY, IDEOLOGY, AND HUMAN NATURE. R. C. Lewontin, Steven Rose y Leon J. Kamin. Pantheon Books, 1984.

THEORIES OF ORIGINS OF MALES HOMOSEXUALITY: A CROSS-CULTURAL LOOK. Robert J. Stoller y Gilbert H. Herdt en *Archives of General Psychiatry*, vol. 42, n.º 4, páginas 399-404; abril de 1985.

MYTHS OF GENDER: BIOLOGICAL THEORIES ABOUT WOMEN AND MEN. Anne Fausto-Sterling. Basic Books, 1992.

HUMAN SEXUAL ORIENTATION: THE BIOLOGIC THEORIES REAPPRAISED. William Byne y Bruce Parsons en *Archives of General Psychiatry*, vol. 50, n.º 3, páginas 228-239; marzo de 1993.

Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica

Ignorada durante cuarenta años, esta teoría constituye un desafío a la concepción probabilista y subjetivista de la realidad que se halla implícita en la formulación estándar de la mecánica cuántica

David Z Albert

Se supone que la investigación de las propiedades de las partículas subatómicas ha establecido, a lo largo de este siglo, que el mundo físico tiene, al menos, tres características sumamente curiosas: en lo más hondo de la naturaleza rige el azar; los objetos materiales ocupan siempre un espacio, pero en determinadas circunstancias no se trata de ninguna región en particular, y —quizá la nota más sorprendente— las leyes fundamentales por las que se gobiernan los objetos físicos "ordinarios" dejan de ser válidas cuando tales objetos sirven de "instrumentos de medición" u "observadores". Así lo decidieron los fundadores de la mecánica cuántica; ése es el dogma, más o menos oficial, de la física teórica, y tal es la lección que exponen los manuales universitarios.

Pero se está abriendo paso la idea de que la adopción de estas conclusiones fue algo apresurada. Hay una teoría cabalmente trenzada y absolutamente diferente que da cuenta también de todos los fenómenos subatómicos conocidos; en ella, el azar no desempeña ningún papel y todo objeto material ocupa siempre una región concreta del espacio. Además, sus leyes básicas forman un conjunto único, aplicable por igual a todos los objetos físicos.

Su principal artífice fue David Bohm, del Colegio Birbeck de Londres. La teoría vio la luz pública hace ya más de cuarenta años, pero se la ha ignorado hasta hace poco. A lo largo de ese tiempo ha dominado la "interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica", así llamada porque los orígenes de la misma se remontan al físico danés Niels Bohr y su círculo.

DAVID Z ALBERT ha investigado en los cimientos teóricos de la mecánica cuántica, con especial atención al problema de la medición. Doctor en física teórica, da clases de filosofía en la Universidad de Columbia.

Empezaré con un esbozo de los principales argumentos a favor de ese dogma imperante. Indicaré, a continuación, de qué manera escapa de ellos la teoría de Bohm. Por último, diré algo acerca de cómo y dónde encaja la teoría de Bohm en las reflexiones actuales sobre los fundamentos últimos de la mecánica cuántica.

La manera más sencilla de formular las razones que respaldan el dogma quizá sea considerar ciertos experimentos con electrones. En todos ellos se miden dos componentes de su espín. Por mor de sencillez, los llamaré espín horizontal y espín vertical. Es un hecho empírico (conforme a lo que hasta ahora sabemos) que los espines horizontales de los electrones sólo pueden tomar uno de dos valores; les daré el nombre de "derecha" e "izquierda". Lo mismo pasa con los verticales: los denominaré "arriba" y "abajo".

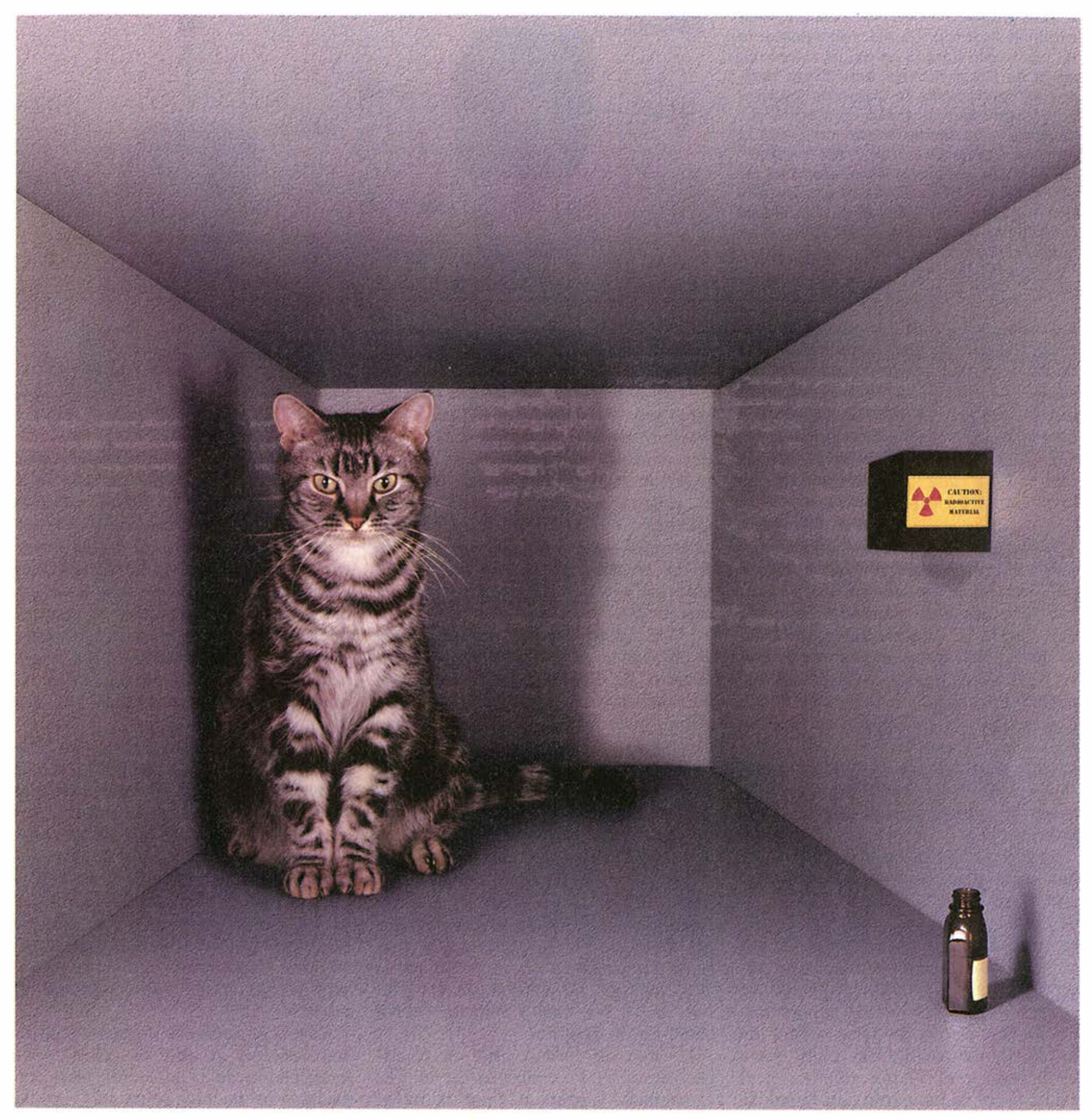
Con las técnicas disponibles podemos medir los espines horizontal y vertical. Los aparatos que lo hacen alteran la dirección del movimiento del electrón que entra en ellos, sobre la base del valor de la componente de espín que se mide. Bastará con medir luego la posición del electrón para determinar dicho valor. Llamaré a esos aparatos de medición cajas, verticales u horizontales (*véase la figura 2*).

Por norma, y ése es otro hecho empírico, no hay correlaciones entre los valores del espín horizontal y vertical de un electrón. Así, cuando entra una gran cantidad de electrones con espín derecha por la abertura de una caja vertical, justo la mitad (en términos estadísticos) sale por la abertura "arriba" y la mitad por la abertura "abajo". Lo mismo les pasará a los electrones con espín izquierda que entren en una caja vertical o a los electrones que tengan espín arriba o abajo y entren en cajas horizontales.

Otra verdad experimental, del mayor interés para nuestro propósito, es que la medición del espín horizontal de un electrón altera el valor de su espín vertical, y viceversa, de manera incontrolable. Si, por ejemplo, se miden los espines verticales de un gran conjunto de electrones entre dos mediciones de sus espines horizontales, se tendrá que la medición del espín vertical cambiará siempre los valores del espín horizontal de la mitad de los electrones y dejará inmutados los de la otra mitad (*véase la figura 3*).

Nadie ha logrado diseñar una medición del espín vertical que evite tales alteraciones. Más aún, nadie ha podido identificar alguna propiedad física de electrones individuales que determine cuáles portarán cambiados sus espines horizontales en el curso de la medición de sus espines verticales y cuáles no.

Ante semejante estado de cosas, la doctrina oficial dice que, por principio, no puede haber una medición del espín vertical que tenga otro efecto que no sea precisamente ése en los valores del espín horizontal. Además, dicta que se debe al puro azar qué electrones son los que sufren el cambio de su espín horizontal cuando se les mide el espín vertical. En breve, las leyes que rigen estos cambios no son deterministas. Estas conclusiones parecen inocuas y razonables, habida cuenta de los datos experimentales.

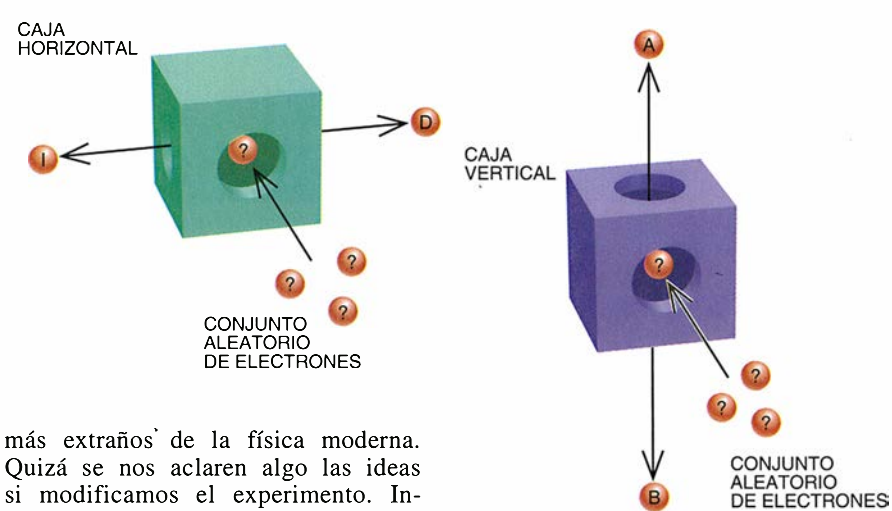


1. UN GATO CUANTICO VIVO es uno de los resultados posibles del famoso experimento mental de Schrödinger, donde una sustancia radiactiva provoca, al emitir una partícula, que se libere un veneno letal. El problema que plantea el experimento consiste en la conciliación de dos hechos: sólo vemos gatos vivos o muertos y las ecuaciones lineales mecanocuánticas de movimiento parecen predecir que los gatos pueden estar en un estado casi inimaginablemente extraño en el que no estarían ni muertos ni vivos. En la formulación estándar, o interpretación de Copenhague, se aborda el problema asignándoles a los observadores o aparatos de medición un papel único e indispensable para que se obtenga un resultado determinado. La teoría de Bohm rechaza esta concepción subjetivista. Solventa el problema sin que los observadores tengan un papel especial.

Si la medición de un tipo de espín altera siempre de forma incontrolable el valor del otro, es que no hay manera de averiguar los valores del espín horizontal y del vertical a la vez en un instante dado. Tenemos ahí un ejemplo del principio de incertidumbre, formulado por Werner Heinsenberg: ciertos pares de propiedades físicas mensurables, como la posición y el momento, o, en nuestro caso, el espín horizontal y el vertical, son incompatibles. La medición de una altera siempre a la otra. Hay muchos otros ejemplos de pares incompatibles de propiedades físicas.

Esto por lo que se refiere al indeterminismo. Pero las partículas subatómicas presentan varios aspectos desconcertantes. Para mostrarlos hace falta un experimento más complicado. Imaginemos una caja que mida el espín vertical de los electrones (*véase la figura 4*). Los electrones con espín arriba saldrán de ella por una trayectoria a la que llamaremos "de arriba" (o "superior"); los que tengan espín abajo, por la "de abajo" (o ruta "inferior"). Coloquemos un par de "paredes reflectoras" que ha-

2. LAS CAJAS DE MEDIDA DEL ESPIN cambian la dirección del movimiento de los electrones basándose en los valores de espín de las partículas. Una "caja horizontal" envía hacia la izquierda los electrones que tienen espín izquierda; los electrones con espín derecha van hacia la derecha (*izquierda*). Una "caja vertical" envía hacia arriba los electrones con espín arriba y envía hacia abajo los que tienen espín abajo (*derecha*). Las letras corresponden a los distintos espines: I, izquierda; D, derecha; A, arriba, y B, abajo.



gan que se corten las dos trayectorias en algún punto. Cabe diseñarlas de manera que no modifiquen en absoluto las propiedades de espín de los electrones. Donde se corten los dos caminos, pongamos una "caja negra" que haga otra vez de ambos uno solo y que tampoco modifique los valores de espín.

Supongamos que entran, uno a uno, numerosos electrones con el espín derecha en la caja vertical. Avanzan por los dos caminos hacia la caja negra y, cuando salen de ésta, se les miden sus espines horizontales. ¿Qué resultados deberíamos esperar? Por estadística basada en la experiencia, la mitad de los electrones tendrá espín arriba y atravesará la caja vertical por el camino superior, y la otra mitad tendrá espín abajo y saldrá de ella por la ruta inferior.

Fijémonos en la primera mitad. No hay nada a lo largo de las trayectorias entre la caja vertical y el punto de salida que afecte a los valores de espín vertical de los electrones. Por tanto, todos abandonarán la caja negra con espín arriba. Entonces, de acuerdo con nuestros datos previos, el 50 por ciento de ellos saldrá de la caja horizontal con el espín hacia la derecha y el 50 por ciento con el espín hacia la izquierda. La mitad de los electrones con espín abajo tendrá justo esa misma estadística de espín horizontal. Juntando todas estas expectativas, se sigue que, para cualquier conjunto nutrido de electrones con espín derecha que entre en el aparato, la mitad debería salir con espín derecha y la otra mitad con espín izquierda.

Parece que son habas contadas. Pero tiene su gracia observar qué pasa cuando se efectúa de verdad este experimento: exactamente el 100 por cien de los electrones con espín derecha cuando entran en este aparato (uno a uno, recuérdese) salen al final con espín derecha también.

No exageramos si decimos que este resultado constituye uno de los más extraños de la física moderna. Quizá se nos aclaren algo las ideas si modificamos el experimento. Insertemos una pared móvil capaz de detener los electrones, que la podamos deslizar a voluntad en el camino superior. Al retirar la pared, tenemos el mismo aparato de antes. Pero mientras la pared permanece, los electrones que van por la ruta de arriba se detienen y sólo los que se mueven por la inferior atraviesan la caja negra.

¿Qué cabría esperar que sucediera al colocar la pared? Para empezar, el número de electrones a la salida de la caja negra debería reducirse a la mitad, pues uno de los caminos está bloqueado. ¿Qué pasaría con la estadística del espín horizontal de la mitad que sigue llegando al final? Con la pared fuera, el cien por cien de los electrones originales, todos ellos con espín derecha, termina con el espín hacia la derecha también. Es decir, todos ellos, sigan el camino superior o el inferior, acaban con espín derecha. Por tanto, como la presencia o ausencia de la pared en la ruta superior no influye en la inferior, el 50 por ciento restante deberá tener espín derecha.

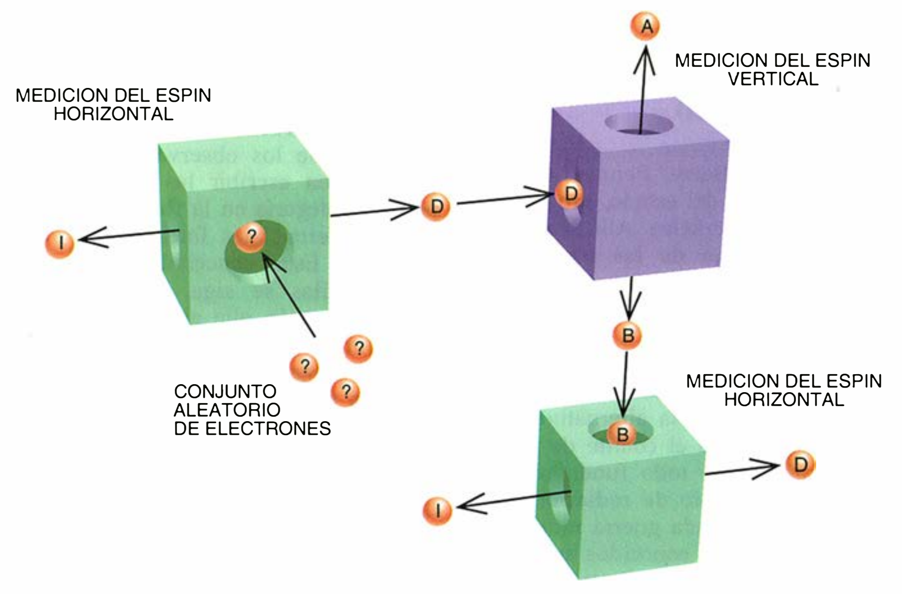
Lo que de verdad pasa en el experimento es lo contrario de lo que esperamos. Llegan al final la mitad de los electrones, de acuerdo con lo predicho. Pero los del otro 50 por ciento no tienen todos espín derecha: la mitad lo tiene hacia la derecha y la mitad hacia la izquierda. Y lo mismo sucede si insertamos una pared en el camino inferior. (Los lectores familiarizados con la mecánica cuántica se habrán percatado de que el experimento es una estilización lógica del famoso experimento de las dos rendijas.)

¿Cómo puede entenderse esta discrepancia entre los resultados de los experimentos y lo que esperábamos que ocurriese? Piénsese en un electrón que atraviese el aparato cuando no hay pared. Piénsese en las posibilidades de que tome uno u otro camino. ¿Podría tomar la vía inferior? Parece que no, pues sabemos que los electrones que toman ese camino (según revela el experimento con la pared colocada) tienen una estadística de espín horizontal de mitad y mitad, mientras que un electrón que atraviese, sin la pared, nuestro aparato tendrá cuando salga espín derecha. ¿Podría, entonces, haber tomado el camino de arriba? No, por las mismas razones.

¿Podría haber tomado ambas trayectorias? Tampoco. Supóngase que detenemos el experimento mientras está pasando un electrón a través del aparato y miramos a ver dónde está. Veríamos que la mitad de las veces se halla en el camino superior y no en el inferior, y que la otra mitad de las veces pasa al revés. ¿Podría no haber tomado ni un camino ni el otro? Con certeza, no. Si bloqueamos ambas rutas, nada atraviesa el montaje.

Según el segundo dogma de la física teórica, el que se refiere a la indefinición de la posición, estos experimentos no nos dejan otra opción que negarle todo sentido a la mera pregunta de cuál ha sido el camino seguido por el electrón a través del dispositivo. Se acepta que preguntar qué ruta ha tomado el electrón viene a ser como preguntar, por ejemplo, qué ideas políticas tiene un bocadillo de atún. La idea es que hacer este tipo de preguntas supone usar inapropiadamente el lenguaje o cometer, como dicen los filósofos, un error categorial.

Los manuales no afirman, a propósito de estos electrones, que las partículas toman el camino de arriba, el de abajo, ambos o ni uno ni otro. Lo que dicen es que no hay un hecho que corresponda a tomar una ruta; no que sea un hecho desconocido,



3. EL COMPORTAMIENTO del espín es alterado por una secuencia de tres mediciones. Se les miden a los electrones —uno a uno— sus espines horizontales (*izquierda*), luego los verticales (*derecha*) y otra vez los horizontales (*abajo*). La caja vertical altera los espines de la mitad de esos electrones, de manera que esa mitad sale de la segunda caja horizontal con el espín hacia la derecha y la mitad con el espín hacia la izquierda.

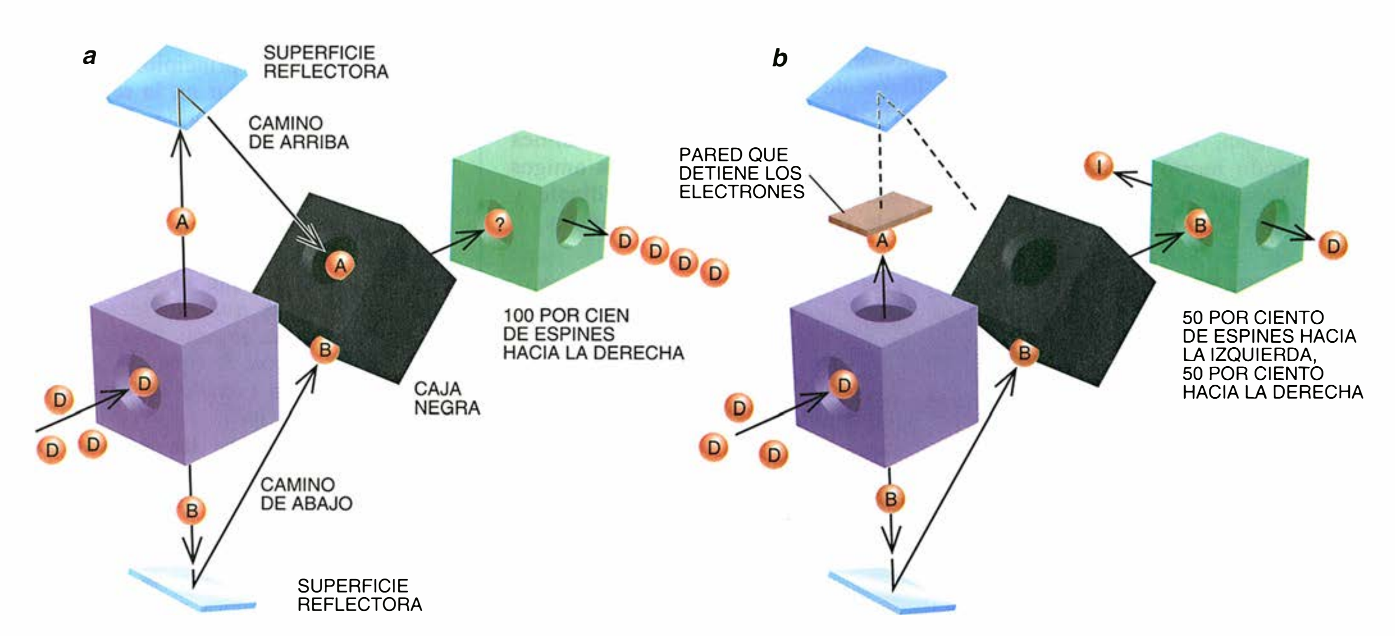
sino que ni siquiera es un hecho. Se hallan en lo que se denomina una superposición de seguimiento de la ruta superior y la ruta inferior a través del aparato.

Pese a lo mucho que violentan estas ideas nuestra imagen intuitiva del mundo y las nociones mismas de materialidad y partícula, se ha elaborado un conjunto cerrado de reglas que ha demostrado ser extraordinariamente eficiente a la hora de predecir qué les acontece a los electrones en esas circunstancias. No sólo eso; dichas reglas —la mecánica cuántica, claro— han tenido también un éxito excepcional al predecir el comportamiento de los sistemas físicos en todas las circunstancias.

Al objeto matemático con el que la mecánica cuántica representa los estados de los sistemas físicos se le da el nombre de función de onda. En el caso de un sistema de una sola partícula, como el que he venido analizando, la función de onda toma la forma de una función directa de la posición. La función de onda de una partícula que esté localizada en una región A, por ejemplo, valdrá cero en cualquier parte del espacio salvo en A, donde no será nula. Similarmente, la función de onda de una partícula localizada en una región B valdrá cero en todas partes excepto en B. Y la función de onda de una partícula en una superposición de estar en A y estar en B —la función de onda, por ejemplo, de un electrón con espín originalmente hacia la derecha que acaba de atravesar una caja vertical— tendrá valores distintos de cero en esas regiones y nulos en cualquier otro sitio.

Es una regla cardinal de la mecánica cuántica (violada por la teoría de Bohm) que la función de onda representa por completo a un objeto físico: todo cuanto hay que decir acerca de un sistema físico dado en un instante dado se lee en su función de onda.

Las leyes físicas tratan de la evolución en el tiempo de la función de onda de los sistemas físicos; según la mecánica cuántica, no de otra cosa podría tratar una ley física, pues no hay nada más de lo que pudiera tratar. A tenor de la versión de la mecánica cuántica que dan los manuales, esas leyes se agrupan en



4. EL ARTILUGIO DE LOS DOS CAMINOS muestra el insólito comportamiento del espín de los electrones. En el panel *a*, los electrones con espín derecha que entran en la caja vertical son enviados por el camino superior o por el inferior. Las superficies reflectoras hacen que los dos caminos converjan en una "caja negra", tras lo cual se halla que todos los electrones tienen el espín hacia la derecha. En el panel *b*, una pared bloquea uno de los caminos, así que sólo la mitad de los electrones llega al final. De éstos, la mitad tienen espín izquierda y la otra mitad espín derecha.

El creador de un feliz mundo cuántico

David Joseph Bohm nació en 1917 en Wilkes-Barre, Pennsylvania. Tras estudiar física en el Colegio Universitario del estado, prosiguió su formación en la Universidad de California en Berkeley. Allí, durante la segunda guerra mundial, investigó la dispersión de las partículas nucleares bajo la supervisión de J. Robert Oppenheimer. Una vez hubo recibido el doctorado en Berkeley, pasó a ser profesor asistente de la Universidad de Princeton en 1946.

En esos años escribió *Teoría cuántica*, en defensa de la interpretación de Copenhague. Pero las dudas sobre su justificación le asaltaban crecientemente y, poco después, en 1952, publicó su propia teoría alternativa.

Durante el maccarthysmo hubo de comparecer ante el comité de actividades antiamericanas bajo la acusación, carente de todo fundamento, de que él y algunos compañeros suyos del laboratorio de radiación de Berkeley simpatizaban con el comunismo. (En la segunda guerra mundial Oppenheimer remitió al FBI los nombres de amigos y conocidos supuestamente filomarxistas. Bohm era, al parecer, uno de ellos.) Creía apasionadamente en la libertad, y se negó a declarar, por razones de principio. Por esa actitud se le acusó de desacato al Congreso.

El incidente fue desastroso para su carrera en los Estados Unidos. Princeton no le renovó el contrato. No pudo encontrar trabajo en ninguna otra universidad, así que dejó su país en 1951 y se marchó a la de São Paulo. Allí, la embajada le requisó el pasaporte, con lo que, de hecho, se le despojó de su nacionalidad.

De Brasil pasó al Instituto Technion y, luego, a la Universidad de Bristol. Aunque más tarde se le absolvió del cargo de desacato y se le permitió volver a los Estados Unidos, se estableció de manera permanente en el Colegio Birbeck de Londres en 1961.

Además de su interpretación de la mecánica cuántica, hizo diversas contribuciones a la corriente principal de la física con trabajos sobre plasmas, metales y helio líquido. En 1959 descubrió con Yakir Aharonov el que hoy se conoce como efecto Aharonov-Bohm. Demostraron que la mecánica cuántica predice que el movimiento de las partículas cargadas se ve condicionado por la presencia de campos magnéticos, aun cuando aquéllas no penetren donde éstos se hallen confinados. Diversos experimentos han ido confirmando este efecto.

En un período posterior de su vida se interesó por cuestiones filosóficas. Elaboró una imagen del universo según la cual éste consiste en la interconexión de todas las cosas, noción a la que dio el nombre de "orden de implicación". Escribió libros de física, filosofía y sobre la naturaleza de la conciencia. Estaba participando en la preparación de otro volumen, esta vez escrito en cooperación, sobre la mecánica cuántica cuando murió de un ataque al corazón en octubre de 1992. Sus amigos y colegas le recuerdan como un hombre que no sólo era brillante y audaz, sino también extraordinariamente franco, educado y generoso.



DAVID J. BOHM* (centro) *entra en la sala de audiencias del comité de actividades antiamericanas escoltado por Donald Appel, el 25 de mayo de 1949.

dos categorías. En esta formulación lo verdaderamente singular es que una de esas categorías se aplica cuando los sistemas físicos en cuestión no se observan directamente, y la otra cuando sí se los observa.

Se suelen escribir las leyes de la primera categoría en la forma de ecuaciones diferenciales lineales "de movimiento". Están concebidas de manera que de ellas se siga, por ejemplo, que un electrón que al principio tenga espín derecha y entre en una caja vertical salga de ésta en una superposición de ir por el camino superior y de ir por el camino inferior. Todas las pruebas experimentales disponibles indican que estas leyes gobiernan la evolución de la función de onda de cada sistema físico microscópico que esté aislado, cualesquiera que sean las circunstancias. Siendo, los sistemas microscópicos, constituyentes de todo lo que existe, parece, pues, que hay una buena razón para suponer que esas ecuaciones diferenciales lineales son las verdaderas ecuaciones de movimiento del universo físico entero.

Pero tal conclusión no puede resultar correcta si es cierto que, como sostiene la mecánica cuántica, las funciones de onda son descripciones completas de los sistemas físicos. Para empezar, las leyes que esas ecuaciones expresan son deterministas y, sin embargo, parece que un elemento de azar puro interviene en los resultados de los experimentos con las cajas de espín.

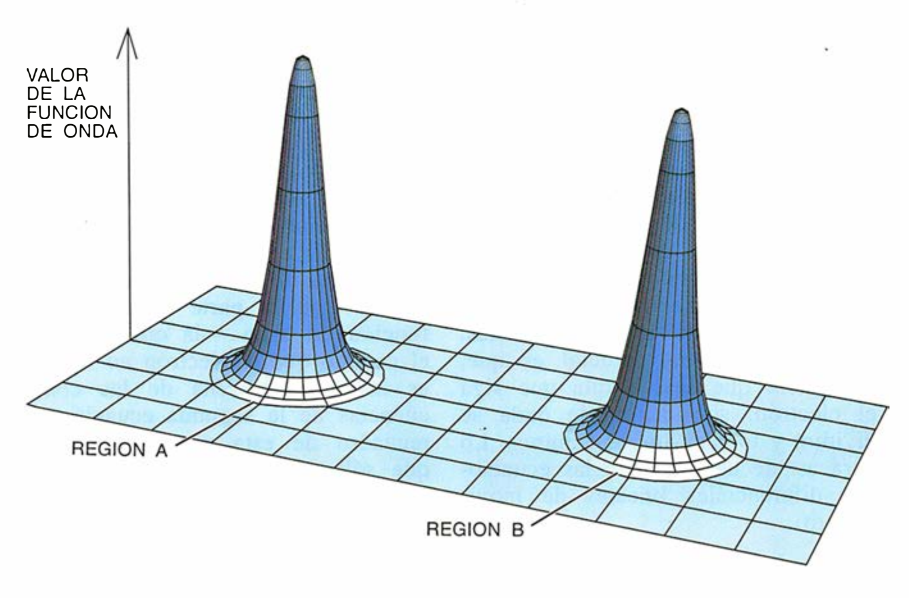
Pensemos en lo que resulta de medir la posición de un electrón que se halle, al principio, en una superposición de estar en la región A y de estar en la región B. Unos cálculos inmediatos revelan que las ecuaciones lineales del movimiento ofrecen una predicción definida acerca del final de ese proceso de medición. Esas ecuaciones, en cambio, no predicen que el dispositivo medidor indique que el electrón se ha hallado en la región A o que ha sido en la región B (que es lo que en realidad pasa cuando se hace una medida de ese tipo).

Muy al contrario, las ecuaciones dicen que el dispositivo de medida ha de terminar, con certeza, en una superposición de indicar que se ha hallado el electrón en A y de indicar que ha sido encontrado en la región B. Dicho de una manera un poco diferente, esas ecuaciones predicen que el aparato de medida ha de acabar en un estado físico en el que, simplemente, no hay un hecho que responda a la pregunta de qué es lo que

el aparato indica. Semejantes superposiciones no describen de forma correcta la manera en que terminan las cosas cuando acometemos una medición real.

Según el razonamiento oficial, hemos de añadir a la primera categoría de leyes una segunda, probabilista. Se exige, por ejemplo, que si se mide la posición de un electrón que esté, al principio, en una superposición de hallarse en la región A y de hallarse en la región B, habrá la posibilidad de encontrarlo el 50 por ciento de las veces en A y el 50 por ciento en B. En otras palabras, si se mide la posición de un electrón, habrá un 50 por ciento de posibilidades de que su función de onda se convierta durante la medición en otra cuyo valor sea cero en todas partes excepto en A, y un 50 por ciento de posibilidades de que se convierta en una que sea nula en todas partes menos en la región B. (A esta alteración se le llama "colapso" de la función de onda.)

¿Cómo se distinguen las condiciones en que se aplican las leyes de la primera categoría de las circunstancias donde valen las de la segunda? Lo único que los fundadores de la mecánica cuántica decían al respecto es que esa discriminación tiene algo que ver con la distinción entre una "medición" y un "proceso físico ordinario", entre lo que observa y lo que es observado, entre el sujeto y el objeto.



5. LAS FUNCIONES DE ONDA DE UNA PARTICULA tienen valores no nulos en las áreas espaciales donde una medición de la posición pueda encontrar la partícula. Según el dogma vigente, la observación hace que la función de onda "colapse", reduciéndose o a la región A o a la B.

Hace tiempo que a muchos físicos y filósofos este estado de cosas les resulta absolutamente insatisfactorio. Les parece absurdo que la mejor formulación que pueda haber de las leyes básicas de la naturaleza dependa de distinciones tan imprecisas y escurridizas. La eliminación o enmienda de esa vaguedad se ha vuelto, en los últimos treinta años, la tarea central de la fundamentación de la mecánica cuántica. El problema es el mismo bajo distintos nombres: gato de Schrödinger, amigo de Wigner o reducción del estado cuántico. Prefiero el del uso corriente: problema de la medición.

Una solución que llama particularmente la atención es la que ideó David J. Bohm. Había propuesto Louis de Broglie una concepción parecida años antes, pero su formulación era mucho menos general y poderosa que la de Bohm. Más recientemente, John Bell le dio a la teoría original de Bohm una forma muy simple y atractiva.

Pese a todas las pruebas en contra presentadas más arriba, la teoría de Bohm considera a las partículas cosas que siempre están situadas en un lugar u otro en concreto. Es mucho más clara que la interpretación de Copenhague en lo que respecta a la constitución del mundo. En la teoría de Bohm, las funciones de onda no son meros constructos matemáticos, sino entes físicos, y las aborda a la manera en que se tratan los campos de fuerza clásicos, así el gravitatorio y el magnético. Las funciones de onda actúan, según esta teoría, como los campos clásicos: empujan a las partículas, las guían —podría decirse— a lo largo del curso que siguen.

Se estipula que las leyes que gobiernan la evolución de esas funciones de onda en el tiempo sean las ecuaciones diferenciales lineales de movimiento de la mecánica cuántica, sólo que esta vez no se hace excepción alguna. Hay leyes en la teoría de Bohm que establecen cómo empujan las funciones de onda a sus respectivas partículas. Todas estas leyes son deterministas. Por tanto, las posiciones, en un momento dado, de todas las partículas del mundo y la función de onda mecanocuántica completa de éste en ese mismo momento pueden calcularse con certidumbre a partir de las posiciones de todas las partículas del mundo y de la función de onda mecanocuántica completa de éste en un momento anterior cualquiera.

Toda incapacidad de efectuar los cálculos, toda incertidumbre en los resultados que arrojen, serán en esta teoría necesariamente epistémicas. Se deberán a la ignorancia, no a la operación de un elemento irreduciblemente aleatorio en las leyes fundamentales del mundo. Pero la propia teoría implica que, por principio, no podemos librarnos de cierta ignorancia. Las leyes de movimiento de la teoría de Bohm nos imponen esta forma de ignorancia, que resulta ser tanta cuanta se requiere, y del tipo preciso además, para que se reproduzcan las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica que nos son familiares. Ello se logra mediante un tipo de promedio de lo que se desconoce, que es justo el tipo de promedio que se emplea en la mecánica estadística clásica.

La teoría describe un proceso físico real, concreto y determinista —y que se puede seguir matemáticamente al detalle— en virtud del cual el acto de medir se introduce en lo que se está midiendo. En otras palabras, la teoría de Bohm implica que esta ignorancia, aunque mera ignorancia de hechos del mundo que están perfectamente definidos, no se puede eliminar sin que se viole una ley física (es decir, sin que se viole una u otra de las dos leyes del movimiento descritas en el recuadro de la página siguiente, de las que se infiere el resto de la teoría de Bohm).

La teoría de Bohm explica cabalmente los resultados de los experimentos que se hacen con el artilugio de los dos caminos, esos experimentos de los que parece desprenderse que los electrones pueden tener estados en los que no hay hecho alguno que responda a la pregunta sobre dónde están los electrones. Cuando

entra en el aparato un electrón que tenga inicialmente espín derecha, la teoría mantiene que tomará o el camino de arriba o el de abajo.

Cuál de los dos será, lo determinarán del todo las condiciones iniciales de la partícula; en particular, su función original de onda y sus posiciones iniciales. Por supuesto, no será posible, y no lo será por ley, averiguar con una medición hasta el último detalle de esas condiciones. Pero aquí el punto crucial es que, cualquiera que sea la ruta que siga el electrón, su función de onda se dividirá y tomará ambos caminos. Lo hará así de acuerdo con las ecuaciones diferenciales lineales de movimiento.

Por consiguiente, en el caso de que el electrón en cuestión tome el camino superior, se reunirá en la caja negra con la parte de su función de onda que fue por la ruta de abajo. De qué manera esta parte inferior de la función de onda irá empujando al electrón una vez se hayan juntado dependerá de las condiciones físicas que hubiera a lo largo del camino de abajo.

Por decirlo de una forma un poco más sugerente: una vez se han reunido las dos partes de la función de onda del electrón, la parte que tomó el camino por el que no fue el electrón puede "informar" a éste de cómo eran las cosas por ese camino. Y, si se inserta una pared en la ruta inferior, la componente de abajo de la función de onda no estará en la salida de la caja negra. Esta ausencia, en sí misma, puede ser una información decisiva. Por tanto, el movimiento que el electrón describa, aun cuando haya seguido el camino superior a través del aparato, dependerá de si se ha insertado o no dicha pared.

Además, de la teoría de Bohm se deduce que la parte "vacía" de la función de onda —la que viaja por el camino que el electrón no sigue— es indetectable. Una de las consecuencias de la segunda ecuación del recuadro de esta misma página es que sólo la parte de la función de onda de cualquier partícula que esté ocupada por la propia partícula podrá influir en el movimiento de otras partículas. Así, a la parte vacía de la función de onda —a pesar de que está real, físicamente— le es del todo imposible dejar alguna traza observable de sí misma.

En consecuencia, la teoría de Bohm explica ese comportamiento, un tanto fantasmagórico, de los electrones con la misma propiedad que la interpretación estándar. Además, está libre de las perplejidades metafísicas asociadas a la superposición mecanocuántica.

En cuanto al problema de la medición, a la teoría de Bohm no le aqueja nada por el estilo. Bohm sostiene que las ecuaciones diferenciales lineales de movimiento describen, fiel y completamente, la evolución de la función de onda del universo entero, incluidos los aparatos de medida, los observadores y cualquier otra cosa. Pero estipula, además, que las posiciones de las partículas tienen una naturaleza factual y están siempre definidas; por tanto, cabe decir lo mismo de las posiciones de las agujas en los dispositivos de medida, de las posiciones de las moléculas de tinta en los cuadernos de notas de los laboratorios, de los iones en los cerebros de los observadores humanos y, por todo ello, presumiblemente, de los resultados de los experimentos.

A pesar de todas las ventajas, bastante espectaculares, de la teoría de Bohm, ésta sólo ha merecido que se rechace hasta su mera consideración. Se ha perseverado en la aceptación de la formulación estándar de la mecánica cuántica. Son muchos los que han venido dejando de lado a la teoría de Bohm porque en ella se da un papel matemático privilegiado a las posiciones de las partículas. La excusa era que tal concesión arruinaba la simetría entre la posición y el momento, implícita en las matemáticas de la mecánica cuántica, como si la quiebra de esa simetría fuese una afrenta a la razón científica mayor que el radical socavamiento de la mismísima idea de realidad física objetiva por la formulación de Copenhague.

Otros descartaban la teoría de Bohm porque no hacía predicciones empíricas (obvias) diferentes de las

Formulación matemática exacta de la teoría de Bohm

La teoría de Bohm consta de tres elementos. El primero es una ley determinista (la ecuación de Schrödinger) que describe la evolución con el tiempo de las funciones de onda de los sistemas físicos. Es ésta:

$$i\frac{h}{2\pi}\frac{\partial}{\partial t}\psi(x_1 \ldots x_{3N}, t) = H\psi(x_1 \ldots x_{3N}, t)$$

donde i es el número imaginario $\sqrt{-1}$, h es la constante de Plank, ψ es la función de onda, H es un objeto matemático, el operador hamiltoniano, N es el número de partículas del sistema, $x_1 \ldots x_{3N}$ representa sus coordenadas espaciales y t es el tiempo. Dicho sea sin afinar mucho, el operador hamiltoniano describe la energía del sistema.

El segundo elemento es una ley determinista del movimiento de las partículas:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \frac{J_1(X_1 \ldots X_{3N}, t)}{|\psi(X_1 \ldots X_{3N}, t)|^2}$$

donde $X_1 \ldots X_{3N}$ representan los valores de coordenadas reales de las partículas, $dX_i(t)/dt$ es el ritmo de cambio de X_i en el tiempo t y J_i representa los componentes de la corriente de probabilidad mecanocuántica estándar. El subíndice i va de 1 a $3N$.

El tercer elemento es una regla estadística análoga a una que se usa en mecánica estadística clásica. Esta regla estipula de manera precisa cómo operar para "promediar" la ignorancia que inevitablemente se tiene del estado exacto de los sistemas físicos. Consiste en lo siguiente. Partamos de que se da la función de onda de cierto sistema, pero no la posición de sus partículas. Para calcular el movimiento de las partículas en el futuro, habría de suponerse que la probabilidad de que las partículas estén actualmente en una posición $(X_1 \ldots X_{3N})$ es igual a $|\psi(X_1 \ldots X_{3N})|^2$. Si se llega a disponer de información acerca de la posición de las partículas (como ocurre durante una medición), la regla indica que esa información ha de usarse para "actualizar" las probabilidades mediante un procedimiento matemático de condicionalización directa.

En esto consiste la teoría de Bohm. Todo lo demás que de ella sabemos —lo que se ha expuesto en este artículo, por ejemplo— deriva de estos tres elementos.

que se derivan de la interpretación estándar, como si el que tengan mucho en común las dos formulaciones desde ese punto de vista favoreciese de manera clara a una en contra de la otra. Aún había otros que citaban "pruebas" bibliográficas —la más famosa de las cuales es la que concibió John von Neumann, pero todas ellas son erróneas— de que ni siquiera era posible que hubiera un sustitutivo determinista de la mecánica cuántica como el que ya había conseguido David J. Bohm.

Por fortuna, esas reticencias son agua pasada. Aunque la interpretación de Copenhague sigue siendo el dogma que guía al común de los físicos, es raro que quienes estudian con seriedad los fundamentos de la mecánica cuántica defiendan aún la formulación estándar. Hay ahora varias nuevas propuestas de interés para solventar el problema de la medición. (Se intenta, por ejemplo, resucitar, con un lenguaje más preciso, la idea del colapso de la función de onda.) La teoría de Bohm tendrá que ser juzgada con respecto a esas propuestas, a las que se conciban en adelante y a los hechos experimentales.



6. EL APOSTATA DE LA MECANICA CUANTICA David J. Bohm —en una fotografía tomada tres años antes de su muerte, acaecida en 1992— formuló su interpretación de la mecánica cuántica en la década de 1950.

La teoría de Bohm es la única propuesta seria totalmente determinista. Es, también, la única que niega que haya superposiciones, ni siquiera en los sistemas microscópicos. Pero no anda libre de transgresiones contra lo que se podría llamar "sentido común físico"; la más flagrante es quizá la no localidad. La teoría permite que lo que pase en la región A tenga, instantáneamente, un efecto físico en la región B, por alejadas que estén ambas entre sí. El influjo es, además, del todo independiente de las condiciones que existen en el espacio entre A y B (*véase* "¿Más veloz que la luz? por Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat y Aephraim M. Steinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1993).

Pero puede que tengamos que aprender a vivir con la no localidad, pues quizá sea un rasgo de la naturaleza. La formulación estándar de la mecánica cuántica tampoco es local, lo mismo que casi todas las soluciones del problema de la medición que se han enunciado en los últimos tiempos. Y es que, de acuerdo con un famoso argumento de Bell, cualquier teoría que reproduzca las predicciones estadísticas, cuyo cumplimiento ya se conoce, de la mecánica cuántica, ha de ser necesariamente no local, si satisface ciertos supuestos relativos a la naturaleza física del mundo. Los únicos modelos concebidos para negar esos supuestos y eludir la no localidad son los de "los muchos mundos" y "las muchas mentes". Según ellos, en algún sentido se dan, realmente, todos los resultados experimentales posibles, y no sólo uno u otro de ellos. Son (quizá) demasiado extravagantes para que se los tome en serio.

No acaban ahí las dudas. ¿Cuál es, en la teoría de Bohm, el estatuto filosófico exacto de las probabilidades? El garantizar que cada partícula del mundo posea siempre una posición determinada, ¿asegura que cualquier medición imaginable tendrá un resultado determinado y que todo lo que nuestra intuición quiere que esté determinado lo está realmente? Estas cuestiones siguen siendo objeto de debate.

Una última observación, muy importante. Debo recalcar que todo lo que se ha dicho en este artículo vale para los sistemas físicos no relativistas. Es decir, se aplica sólo a los sistemas cuyas energías no son muy altas, que no se mueven a velocidades cercanas a la de la luz y que no están expuestos a campos gravitatorios muy intensos. La elaboración de un sustitutivo bohmiano de la teoría cuántica de campos relativista está en marcha, aunque no hay garantías absolutas de que la empresa termine en éxito. Si se viese que ese reemplazo es imposible, habría que abandonar la teoría de Bohm y sanseacabó.

Pero a la mayoría de las otras propuestas de resolución del problema de la medición les pasa lo mismo. Las excepciones vuelven a ser las interpretaciones de los muchos mundos y de las muchas mentes, cuyas generalizaciones relativistas son inmediatas, aunque difíciles de creer sus aseveraciones metafísicas. En buena medida, el curso que en el futuro siga la fundamenación de la mecánica cuántica dependerá del resultado que arrojen los intentos de relativización.

Mientras tanto, lo noticioso es que, en los fundamentos de la mecánica cuántica, hay muchas cosas que no están en absoluto claras. En particular, tanto la posibilidad de que las leyes de la física sean deterministas del todo como la de que describan movimientos de partículas (o algo análogo a esos movimientos en la teoría cuántica de campos relativista) vuelven a hallarse sobre la mesa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A SUGGESTED INTERPRETATION OF THE QUANTUM THEORY IN TERMS OF "HIDDEN" VARIABLES I AND II. David Bohm, en *Quantum Theory and Measurement.* Dirigido por J. A. Wheeler y W. H. Zurek. Princeton University Press.

ON THE IMPOSSIBLE PILOT WAVE. En *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, de John S. Bell. Cambridge University Press, 1987.

BOHM'S THEORY. En *Quantum Mechanics and Experience*, de David Z Albert. Harvard University Press, 1992.

QUANTUM EQUILIBRIUM AND THE ORIGIN OF ABSOLUTE UNCERTAINTY. Detlef Dürr, Sheldon Goldstein y Nino Zanghi en *Journal of Statistical Physics*, volumen 67, números 5/6, páginas 843-908; junio 1992.

Perfiles

Philip Yam

FANG LIZHI: *Los derechos humanos de un cosmólogo*

A los pocos días de haber obtenido una cita para entrevistar a Fang Lizhi, me sorprendió encontrar un artículo suyo sobre cosmología en *Physical Review Letters*, una revista de ciencia dura. ¿Es que un disidente político en el exilio no tiene nada más importante de que preocuparse que de las fluctuaciones estocásticas del universo? La respuesta, lo comprendí más tarde, resulta bastante sencilla: Fang es ante todo un científico. Su apasionada defensa de la democracia en China, que culminó con su exilio en 1990, dimana de su condición de físico. “Al estudiar lo que sea, uno debe plantear preguntas. Pero las autoridades comunistas no quieren que nadie se plantee preguntas”.

Fang Lizhi, que tiene 58 años, no es ningún radical. Se limita a poner los hechos sobre la mesa. Pero al acusar abiertamente al partido de opresión, incompetencia y corrupción, ha enfurecido a las autoridades de un país donde las apariencias, el orden y el orgullo nacional lo son todo. Fang indica que el propio de Den Xiaoping montó en cólera. La valentía del físico por decir públicamente lo que los otros sólo se atreven a pensar puede amenazar el lugar que guarde la historia para un estadista considerado como el gran reformador, que sacó a China del abismo de la Revolución Cultural para llevarla a la era moderna. “Deng me ha tomado por su enemigo personal, no sólo como enemigo del partido. Todos mis asuntos los decide él”. Fang cuenta que, entre esos asuntos, está su apartamento de Beijing, que permanece intacto porque Deng no ha dado órdenes de requisarlo. “Todavía pago el alquiler”.

El pago del alquiler de un apartamento al que no puede volver es sólo un ejemplo de cómo Fang concede pleno sentido a los detalles de la vida ordinaria. Sentado en su despacho de la Universidad de Arizona en Tucson, parece un profesor más de astrofísica. De hecho, desprende un aire de absoluta normalidad. Sus parientes cercanos viven en los Estados Unidos. Su hijo mayor es ingeniero de sistemas informáticos en la Chrysler y el pequeño da clases de física en una escuela de Wisconsin.

Las manifestaciones de la plaza de Tiananmen, en 1989, y la brutal masacre que siguió, fueron el último eslabón del proceso que llevó a la defenestración de Fang y Li Shuxian, su mujer. Desde que subió al poder al acabar la segunda guerra mundial, el gobierno comunista de China ha entablado una relación de amor y odio con los intelectuales. Los altos cargos del Partido Comunista reconocen la necesidad de contar con los científicos para modernizar el país. Pero la independencia intelectual mina la autoridad del partido.

El físico exiliado Fang Lizhi cree que la democracia acabará por imponerse en la República Popular China

El primer golpe de timón comenzó un año después de que Fang se graduara en física por la Universidad de Beijing. En 1957, Mao Tse Tung invitaba a los intelectuales a expresar sus pensamientos sobre la reforma. Tal como había predicho el presidente, brotaron muchas flores, entre ellas Fang, que sostenía que el sistema educativo debía cambiar, de suerte que la política no se entrometiera en la ciencia. Asombrado ante las críticas, Mao cortó por lo sano lanzando la campaña antiderechista, destinada a devolver al redil a los reticentes. Fang fue expulsado del partido e internado en un campo de trabajos forzados durante ocho meses. “Incluso entonces seguía creyendo en el comunismo”, recuerda.

Tras cumplir su condena, regresó a la vida académica, y se puso a investigar sobre mecánica cuántica, física del estado sólido y láseres. Joven y con talento, pronto medró hasta convertirse en profesor de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Beijing. Pero la desilusión hacia el maoísmo iba creciendo en él. “Perdí mi fe marxista en los sesenta. Poco a poco, me dí cuenta de que el grupo de Mao sólo buscaba permanecer en el poder”. La Revolución Cultural comenzó a cristalizar el desencanto de Fang. Temiendo que influencias capitalistas extranjeras debilitaran el fervor revolucionario, Mao ordenó la extirpación de cuanto, aun remotamente, pudiera considerarse burgués. Fang fue enviado a “reeducarse” al sur del país, mediante el duro trabajo en una mina y en un ferrocarril.

El trabajo forzado decantó su interés por la astrofísica. “Durante la

Revolución Cultural estaba prohibido leer cualquier papel, excepto el *Libro rojo* de Mao". Sin embargo, se las arregló para escamotear una copia de la *Teoría clásica de campos*, de Lev Landau. "No había otra cosa, así que me lo leí varias veces". La segunda parte del libro, dedicada a la relatividad general, le despertó su vocación por la cosmología.

Como si estuviera marcado por el destino, la astrofísica hizo que Fang sobresaliese aún más. "Mi primer artículo sobre cosmología apareció en 1972", recuerda. Técnico y oscuro, sólo unos pocos ejemplares llegaron a circular. Hubiera sido ignorado de no ser por la obsesión ideológica del gobierno. Como la corriente moderna de la cosmología considera que el universo tuvo un origen, los ideólogos de Mao creían que eso comportaba la existencia de una deidad, algo antitético a la concepción marxista del mundo. La contraposición llevó a la denuncia pública del escrito de Fang. "Las autoridades escribieron un artículo muy largo en un periódico", cuenta Fang, disfrutando de la ironía: "Comencé de ese modo a hacerme famoso".

El Partido Comunista le devolvió el carné en 1978, una vez cerrada la Revolución Cultural. En el intento de modernizar China, Den Xiaoping, sucesor de Mao, invitó a muchos intelectuales perseguidos a regresar al partido. Fang lo hizo así, pues pensó que la mejor manera de cambiar las cosas era desde dentro: "Si uno quería hacer algún bien, no rechazaba el ofrecimiento". Se convirtió en el catedrático más joven de China en 1984 y accedió al vicerrectorado de la Universidad de Ciencia y Tecnología.

En esa década, la prominencia política de Fang cobró particular relieve. "Me parece que mi contribución a la democratización de China son los discursos que di durante los ochenta", reflexiona. "En esos discursos vertía ideas elementales acerca de los derechos humanos". Galvanizaron a una generación de jóvenes intelectuales.

Al principio, el partido toleró su voz discrepante. "Adquirí cierto predicamento, no sólo en política, sino también como profesor de física, de modo que las autoridades chinas no sabían cómo tratarme", explica. Mas, conforme se fue extendiendo la influencia de Fang, se iba agotando la paciencia del partido. A finales de 1986, las manifestaciones estudiantiles habían sacudido las aulas de varias universidades, y las autoridades tomaron represalias contra los responsables. Lo volvieron a echar del partido y lo reasignaron al Observatorio de Beijing. Una fulgurante serie de artículos en los periódicos estatales responsabilizaban a Fang de las protestas estudiantiles.

Fang cree que Deng en persona le expulsó del partido. Cuenta las cosas pausadamente: "Si se quiere expulsar a un miembro del partido, primero debe darse un voto de las autoridades locales. Normalmente, lleva varios meses votar, aprobar, votar. En los comités locales, a veces se puede expulsar directamente a un miembro, pero sólo en situaciones de emergencia. ¿En qué situaciones de emergencia? Durante una guerra, en un terremoto". Y añade: "¡Pero yo no soy ni una guerra ni un terremoto!" No puede aguantarse la carcajada: "Quizás un terremoto político".

En enero de 1989 le escribió a Deng para pedirle la liberación de Wei Jingsheng, un disidente político encarcelado a quien se ha comparado con Lech Walesa por su condición de obrero. (Wei fue por fin liberado el año pasado.) "La carta tuvo una gran acogida en todo el país. Muchos intelectuales de renombre se me unieron y me apoyaron".

> "Durante la Revolución Cultural estaba prohibido leer cualquier papel, excepto el *Libro rojo* de Mao"

Declara que no intervino directamente en las manifestaciones de la plaza de Tiananmen que empezaron en abril, pero cree que el partido le identificó como uno de los principales instigadores: "Hasta sacaron mi foto por televisión". Tras los asesinatos del 4 de junio, voces amigas aconsejaron a Fang y Li que buscaran refugio en la embajada estadounidense, donde permanecieron hasta que el régimen de Deng y de Departamento de Estado norteamericano hallaron una manera de liberarlo que permitiera salvar la cara.

"Fueron tiempos difíciles, pero seguía produciendo. Publiqué varios artículos científicos". Y saca uno que escribió sobre el corrimiento hacia el rojo de los cuásares. "Lo redacté en la embajada". En la dirección se lee remitido desde la Universidad de Roma. "No estaba allí, obviamente. Quería haber puesto 'Embajada estadounidense en Beijing', pero a los del Departamento de Estado no les pareció prudente".

Un año después se presentó la oportunidad de abandonar la embajada, cuando Fang se quejó de unas leves palpitaciones en el corazón, que atribuye al exceso de café. Los funcionarios exageraron la gravedad de su estado, filtrando la especie de que había sufrido un ataque al corazón.

Aunque en el exilio Fang ya no ejerce la misma influencia de que gozaba hace un decenio, su azarosa historia ayudó a poner de relieve el escaso respeto de China por los derechos humanos. Cartas sacadas a escondidas de los campos de trabajos forzados y relatos de antiguos confinados que ahora viven fuera hablan de apaleamientos, malnutrición y deficiente asistencia médica.

Con motivo de la formalización de acuerdos comerciales tornan a cobrar vigor las cláusulas sobre el respeto a los derechos humanos. Pero la respuesta china es siempre la de adoptar una actitud belicosa ante lo que percibe como una injerencia extranjera. Algunos políticos han pedido que se separe el asunto de los derechos humanos de los acuerdos comerciales. "Sí, he oído que algunos quieren seguir con los negocios como siempre. No me parece una buena idea". Arguye que la separación de ambos asuntos no servirá más que para aliviar las presiones que empujan al sistema hacia la democracia.

Cuando le pregunto si algún día podrá regresar a su país, me responde con un dato: no puede volver mientras Deng, que ya tiene 89 años, siga con vida. Fang se mantiene en contacto con amigos y parientes de China, donde su hermano, ingeniero aeroespacial, es miembro del partido. ("Desde luego, tenemos opiniones diferentes".) Puede llamar a su madre en Beijing, pero admite que ha de tener cuidado con lo que escribe a otra gente. ("Me abren las cartas".) La red Internet le proporciona una estrecha relación. "Dispongo de correo electrónico, de modo que puedo comunicarme con China. Incluso he publicado un artículo con algunos de mis colegas".

Tiene la impresión de que muchos miembros del partido ya no se adhieren al maoísmo. Además, afirma, si se les pregunta a los campesinos de las zonas más aisladas, a los que muchas veces se les tacha de apolíticos, admiten que ellos quieren escoger a sus dirigentes directamente, con lo que muestran su capacidad para la democracia. "Tarde o temprano —dice este físico exiliado— acabará por imponerse".

Ciencia y sociedad

Humedales

Ansares de las lagunas de Villafáfila

Los ánsares comunes del norte y centro de Europa realizan, desde tiempo inmemorial, viajes migratorios hacia zonas sureñas. El destino peninsular se sitúa mayoritariamente en las marismas del Guadalquivir y las lagunas de Villafáfila (Zamora); sumadas ambas zonas concentran el 99,4 % de la población invernante del ánsar común en nuestro país.

Durante el último medio siglo hemos asistido a un notable incremento de las poblaciones de ánsares y barnaclas europeas. En el Paleoártico Occidental —superficie que abarca Europa, norte de Africa y Asia Menor— hay 24 poblaciones biogeográficas, que se distinguen por su ubicación y características biológicas. De esas 24 poblaciones, 14 han presentado un claro incremento, 7 se mantienen estables, de una se desconoce su situación y únicamente dos poblaciones muestran una disminución. Si este aumento lo lleváramos a cifras nos encontraríamos, según Jesper Madsen, que se ha pasado de 300.000 ejemplares de ánsares y barnaclas en los años sesenta a 2.000.000 en los años ochenta.

De las 9 especies que invernan en Europa, sólo 2 visitan nuestro país de una forma habitual, el ánsar campestre (*Anser fabalis* ssp. *rossicus*), procedente de la tundra siberiana, y el ánsar común (*Anser anser* ssp. *anser*), mientras que el resto lo hace de forma ocasional. El ánsar campestre presenta una fuerte regresión en España, donde ha pasado de los 3800 ejemplares en 1981 a los 45 censados en enero de 1994 en su único punto de invernada estable situado en Zamora. Sin embargo, la dinámica de la población de esta especie, por lo que a Europa se refiere, presenta un notable incremento de sus efectivos y parece ser que su disminución en España está ligada a cambios en sus hábitos de invernada.

El ánsar común manifiesta un notable incremento de sus poblaciones europeas y españolas. Esta especie tiene en Europa Occidental dos poblaciones bien diferenciadas por su zona de origen e invernada. La primera cría en Islandia y Gran Bretaña e inverna mayoritariamente en Gran Bretaña. La otra población cría principalmente en Noruega, Suecia, Alemania, Dinamarca y Polonia, e inverna mayoritariamente en España, aunque en los últimos años han empezado a hacerlo en buen número también en Holanda.

Respecto a la invernada del ánsar común en España, el primer censo, de 1967, contabilizaba 19.000 ejemplares localizados casi exclusivamente en las marismas del Guadalquivir. Desde entonces hasta 1980 se produjo un aumento lineal. Se registra luego cierta estabilidad con máximos alrededor de los 80.000 y mínimos cercanos a los 50.000, apareciendo además otra zona importante de invernada para el ánsar común en las lagunas de Villafáfila y encontrándose grupos más o menos numerosos en Fuentes de Nava (Palencia), embalse de Orellana (Badajoz), Aigüamolls del Ampurdán (Gerona) y otros.

Las causas del fuerte incremento en las poblaciones de ánsares comunes son varias. En primer lugar, cambios en la regulación europea de la caza. Barwolt S. Ebbinge, del Instituto de Investigación para la Gestión de la Naturaleza en Arnhen, estudió la influencia de las normativas de caza en los cambios de las poblaciones de barnacla cariblanca (*Branta leucopsis*) y llegó a la conclusión de que la incidencia de la caza sobre la población de esta especie pasó del 26 % entre 1957-69 al 12 % entre 1978-84; lo mismo observó que sucedía con el ánsar careto grande (*Anser albifrons*), donde la incidencia de la caza pasó del 31 % entre 1953-68 al 16 % entre 1970-85, unos resultados extrapolables al ánsar común.

Otra causa fue la protección de numerosas zonas húmedas de Europa, entre ellas la creación del Parque Nacional de Doñana en 1969. Contribuyeron también a ese incremento demográfico la reintroducción del ánsar común en Francia, Bélgica y Suecia.

Estos aumentos poblacionales no han ido acompañados, la mayoría de las veces, de la colonización de nuevos territorios de invernada. La mayor densidad de ánsares y su consiguiente presión sobre el medio han provocado un creciente malestar entre los agricultores y ganaderos europeos, que sufren los daños que estas especies producen sobre cultivos y pastizales. Los estudios realizados sobre la incidencia de los ánsares y barnaclas en los cultivos ponen de manifiesto el carácter variable de los daños según la planta cultivada, la época del año, la climatología y la presión de pastaje.

De esos factores importan, sobre



*Ansar común (*Anser anser*)*

todo, la época del año en que se realiza el pastoreo de los ánsares y la climatología. La incidencia es baja cuando el pastoreo se produce en los meses invernales, y grande cuando éste se realiza en primavera. Pierre Ernst determinó que los daños en Westfalia variaron por causas climáticas entre 450 kg de materia seca en 1982-83 y 160 kg de materia seca en 1986-87.

No abundan los trabajos sobre la repercusión de los ánsares en la vegetación lagunar. De acuerdo con las investigaciones emprendidas por el equipo de J. A. Amat en el Parque Nacional de Doñana, el ánsar común tiene allí como elemento básico de su alimentación el tubérculo de la "castañuela" (*Scirpus* sp.); cifran las pérdidas de castañuela atribuidas al pastoreo de los ánsares comunes en un 47 % en 1981-82 y del 81 % en 1982-83. Los pastizales y zonas cultivadas fueron utilizados masivamente sólo en los años muy secos o muy lluviosos.

La reserva nacional de caza "Las lagunas de Villafáfila" comprende 32.682 hectáreas. Creada en 1986 en la Tierra de Campos zamorana sobre la estepa cerealista, hay en su centro un complejo de lagunas salobres de carácter temporal perteneciente a los términos municipales de Villarrín, Revellinos y Villafáfila. El complejo lagunar posee una superficie máxima de inundación de unas 500 hectáreas; las lagunas principales son la Grande, la de Barillos y la de las Salinas. El complejo tiene un carácter salino y temporal, lo que impide la presencia de fauna acuícola permanente y fomenta el desarrollo de macrófitos que permiten, a su vez, la existencia de gran cantidad y variedad de aves ligadas al agua.

En esa zona se refugian aves acuáticas y esteparicas. De las últimas destacan la avutarda, que presenta la mayor densidad mundial de la especie con una población de 2085 ejemplares según el censo de marzo de 1994, los sisones, el cernícalo primilla y el aguilucho cenizo. Entre las aves acuáticas sobresalen el ánsar común con máximos de 23.500 ejemplares en 1991, la cigüeñuela con más de 700 ejemplares en 1994, avoceta, pato cuchara, cerceta carretona, ánade rabudo y azulón.

El ánsar campestre, que tuvo hasta mediados de siglo una importante población invernante en la reserva, muestra hoy una presencia esporádica. Todo lo contrario ha ocurrido con el ánsar común, que hace pocos años era una especie de paso. A partir de 1975 se comienza a producir la invernada regular de la especie en la zona hasta alcanzar, en 1991, la cifra de 23.560 ejemplares. Desde entonces, y como consecuencia de la sequía, ese número decae hasta 13.088 de enero de 1992, para volver a aumentar hasta los 22.978 de enero de 1994.



La desaparición de la "castañuela" (Scirpus sp.) *de la laguna Grande ha obligado a los ánsares comunes a utilizar casi exclusivamente los campos de cereal como fuente de alimentación*

La bajada del nivel de las lagunas por la sequía ha promovido una de las mayores concentraciones de Europa de aves acuáticas por hectárea de laguna inundada: 216 anátidas por hectárea de laguna inundada en el año 1992, en comparación con las 2 o 3 que albergan la mayoría de nuestras zonas húmedas protegidas. El 85 % de estas acuáticas invernantes son ánsares comunes que han empezado a causar serios problemas sobre las lagunas y sus alrededores.

Donde más se ha notado el efecto del aumento de la población de ánsares ha sido en la laguna Grande, la única que ha tenido agua durante la invernada desde 1991. Mediados los ochenta, y coincidiendo con el aumento del ánsar común en la reserva, se empezó a detectar una fuerte disminución en la densidad de castañuela (*Scirpus maritimus* y *S. littoralis*) en las lagunas. Dicha planta había sido hasta ese momento el principal alimento de la especie.

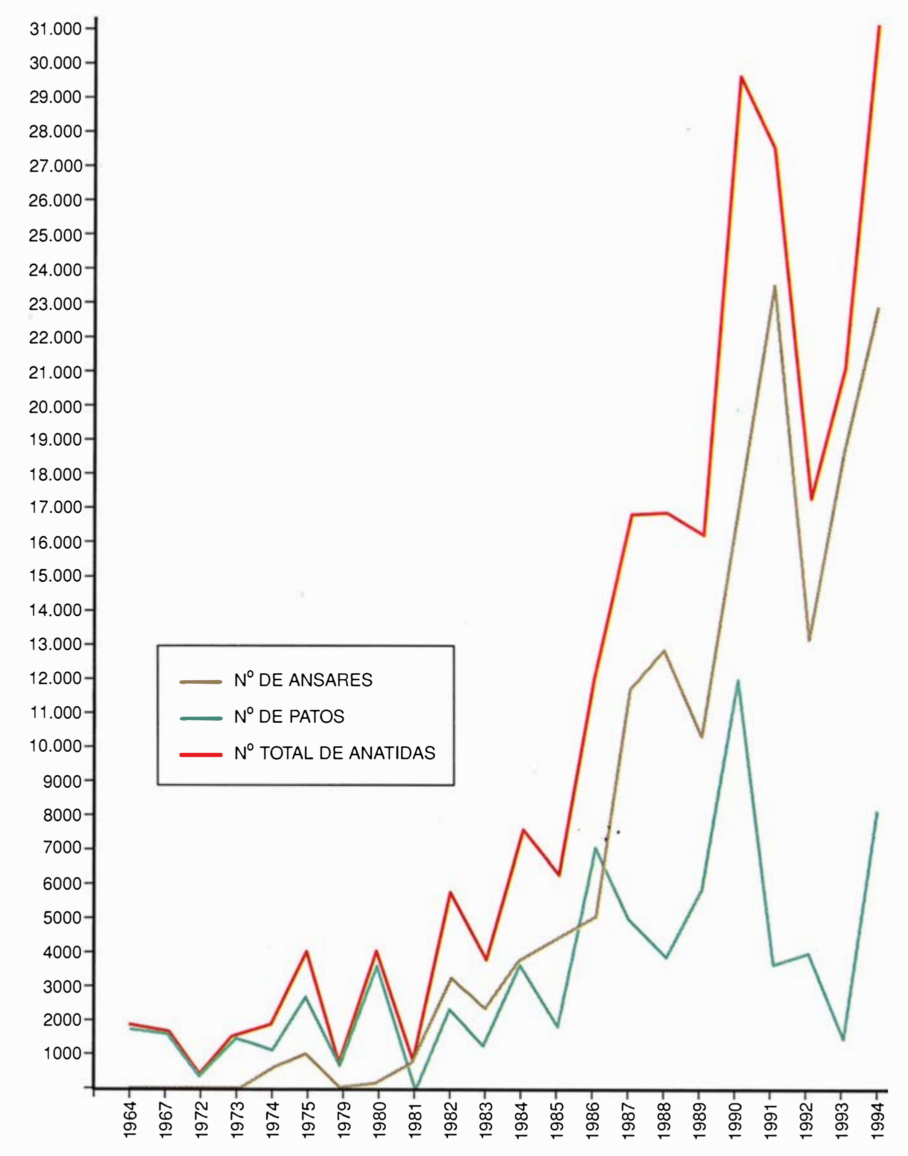
Al objeto de determinar la responsabilidad de los ánsares sobre esta disminución de la castañuela se esta-



Excrementos dejados por los ánsares en una isla de la laguna Grande



La colocación de collares de diferentes colores, según el país de marcaje, permite realizar un seguimiento de la especie a gran distancia



Evolución de las anátidas invernantes en la reserva de "Las lagunas de Villafáfila"

blecieron, durante la invernada de 1990/91, varias "parcelas testigo" convenientemente alambradas para impedir el acceso de los ánsares. Llegado el verano, se compararon las diferencias de densidad de *Scirpus* sp. de las diferentes parcelas con la del resto de las lagunas mediante conteo directo de las plantas existentes. Resultó que, en la laguna Grande, donde predomina *Scirpus littoralis*, se produjo una disminución del 59,55 % de la castañuela en las zonas donde comían los ánsares; en la laguna de Barillos, donde predomina *Scirpus maritimus*, la disminución media de la castañuela fue del 86,9 %.

Era evidente la fuerte caída de la densidad de castañuela como consecuencia del arranque a que era sometida por los ánsares. Sin embargo, en la invernada siguiente se empezó a detectar la desaparición de la castañuela en las zonas pastadas y en las "parcelas testigo". Esta situación se agravó en 1993 con la práctica desaparición de toda la vegetación palustre en la laguna Grande, unida a una gran proliferación de algas.

Los análisis de agua mostraron que la laguna presentaba una alarmante falta de oxígeno, lo que explicaba en parte la proliferación de algas, pero no la desaparición de la vegetación palustre. Se detectó también un espectacular aumento de la salinidad. Estos cambios en las características del agua no sólo están afectando a la vegetación, sino que es casi segura su incidencia negativa sobre la extraordinaria riqueza en invertebrados de la laguna.

Ante la gravedad del problema nos planteamos una serie de hipótesis sobre las causas que han podido influir en el cambio de las características del medio. Resolvimos que se debía a la combinación de cuatro factores: fuerte sequía, excesiva concentración de anátidas, acelerado proceso de colmatación y aportes de agua salada.

Desde 1991 la zona está sufriendo una fuerte sequía que ha producido un aumento de la salinidad en la laguna Grande. Este factor, sin embargo, no es capaz de explicar por sí solo la situación actual, al haberse registrado sequías similares en el último siglo sin comportar las mismas consecuencias.

La excesiva concentración de anátidas, en especial ánsares, tiene una repercusión directa sobre la vegetación por medio de su arranque y pisoteo, e indirecta mediante el aporte de excrementos al agua. Durante el año de 1993 establecimos diversas "parcelas de muestreo" para determinar la cantidad de materia orgánica

seca que entra en la laguna Grande procedente de los excrementos de las aves. Los resultados obtenidos nos mostraron que al menos 84 toneladas anuales de materia orgánica seca llegan a la Salina Grande de excrementos de los ánsares. Las lagunas están perdiendo profundidad debido al arrastre de sedimentos que se acumulan en el fondo, dificultando la regeneración vegetal y disminuyendo la profundidad. La colocación de trampas de sedimentos en 1989 reveló sedimentaciones medias cercanas al centímetro en la laguna Grande.

Desde hace unos 20 años, se vierten sobre la laguna pequeños caudales de agua salada procedentes de pozos artesianos construidos con fines agrícolas y que se abandonaron por su salinidad. En nuestra opinión, los factores segundo y tercero son los desencadenantes principales de la situación, agravada por la sequía. Sin embargo, en 1994 las buenas condiciones climáticas han permitido que las lagunas permanecieran llenas a lo largo de toda la temporada, lo que ha mejorado sensiblemente la situación en la laguna Grande, pese a lo cual no ha logrado ésta recuperar la vegetación palustre.

La desaparición de la castañuela no ha provocado, por ahora, una disminución sustancial en el número de ánsares comunes invernantes en la reserva de las lagunas de Villafáfila. Sí se ha producido una modificación en los hábitos alimentarios de la especie. Así, a mediados de los ochenta los ánsares comunes gastaban más del 50 % de su tiempo en alimentarse dentro de las lagunas de la reserva, para ir luego éstas transformándose paulatinamente en lugar de sesteadero y dormidero de los gansos.

El incremento del pastaje sobre los campos de cereal se ha acogido con temor por los agricultores, que ven cómo bandadas de ánsares hambrientos entran en sus cultivos. Sin embargo, el daño producido por estos bandos resulta ser más psicológico que real.

Se ha comprobado que el pastoreo efectuado por los gansos tiene escasa repercusión sobre la producción: en los campos de cereales se instalaron diversas "parcelas testigo", recubiertas de alambre para impedir el paso de los ánsares, a la vez que se observaba periódicamente su comportamiento alimentario. Se compararon estas parcelas con zonas inmediatas pastadas por los ánsares, y no se apreció ninguna diferencia significativa. Los ánsares prefieren las rastrojeras; además, abandonan la reserva durante los últimos días de febrero y primeros de marzo, con lo que el cereal se recupera durante la primavera.

Se está estudiando la incidencia de los ánsares comunes sobre las poblaciones de avutarda, para determinar si ésta se ve desplazada de las zonas perilagunares por culpa de las grandes concentraciones de ánsares. Los resultados obtenidos hasta ahora no permiten extraer ninguna conclusión.

MARIANO RODRÍGUEZ ALONSO
y JESÚS PALACIOS ALBERTI,
Servicio de Medio Ambiente y
Ordenación del Territorio (Zamora)
Junta de Castilla y León

Cosmología

De Einstein a Lovelock

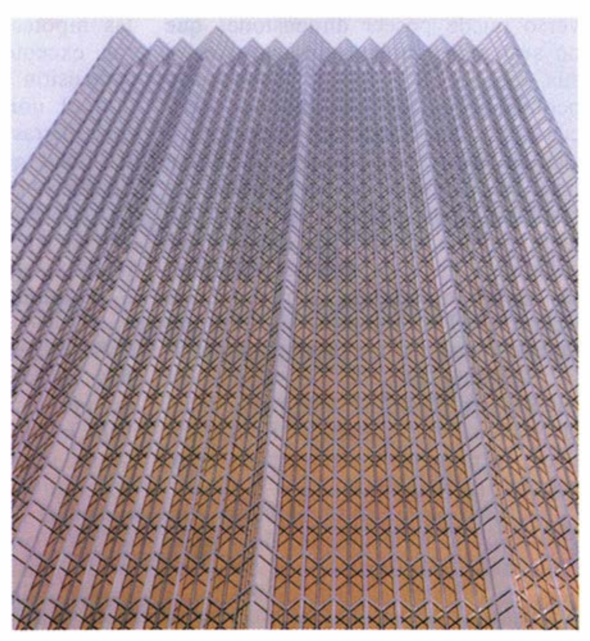
En 1915, Albert Einstein formuló su famosa ley de la relatividad general, teoría que parece explicar correctamente las interacciones gravitatorias observadas en el universo. De acuerdo con Einstein, el espacio-tiempo no es un marco pasivo en el que se desarrollan los procesos físicos, sino que su estructura geométrica depende íntimamente de la materia que contiene.

Las ecuaciones de Einstein imponen la igualdad entre la matriz que describe la energía y los momentos de la materia existente y el llamado tensor de Einstein. Dicho tensor es una matriz con información geométrica construida a partir de la métrica, la variable que determina la distancia entre dos puntos del espacio-tiempo. El paradigma einsteiniano afirma, pues, que geometría y materia son dos expresiones distintas de una sola realidad física.

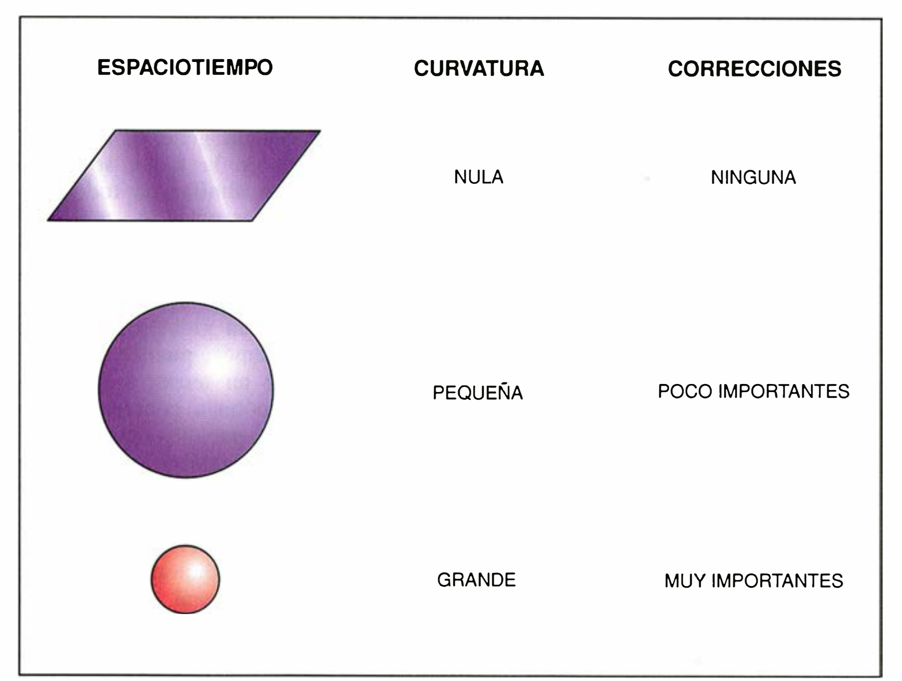
Alrededor de los años veinte, H. Vermeil, H. Weyl y E. Cartan demostraron que la relatividad general es la única teoría aceptable para describir la gravedad, si se admite una serie de hipótesis bastante generales. Estas hipótesis fueron refinadas por David Lovelock en los años setenta, y pueden ser agrupadas en tres clases.

En primer lugar, tendríamos los principios de carácter fundamental, como el principio de equivalencia, que asegura que en caída libre la gravedad no es detectable localmente, y el principio de covariancia general, según el cual las leyes de la física se enuncian de manera similar en todos los sistemas de referencia. A continuación encontraríamos las restricciones sobre el comportamiento de la materia: la energía y los momentos materiales se conservan globalmente en el universo (y, además, pueden ser descritos mediante un tensor simétrico). El resto de hipótesis concierne a la naturaleza del espacio-tiempo: el número total de dimensiones es igual a cuatro, y las leyes físicas dependen, como mucho, de la métrica y su primera y segunda derivadas temporales. Esta útima condición recoge una propiedad casi general de la física clásica, cuyas ecuaciones contienen, a lo sumo, la posición de las distintas partículas y sus velocidades y aceleraciones respectivas, esto es, las dos primeras derivadas de la posición respecto al tiempo. Si se suprime este requisito, las teorías gravitatorias que se obtienen presentan graves problemas de coherencia interna.

Dado lo razonable de las hipótesis anteriores, la validez de la relatividad general parece incuestionable. Sin embargo, tras un análisis más cuidadoso, al menos una de las condiciones admitidas puede ponerse en tela de juicio, a saber, la dimensionalidad del espacio-tiempo.



Desde lejos, nuestra visión apenas distingue el grosor de los tubos que forman la estructura externa de este rascacielos. Igualmente, el universo puede poseer dimensiones que no percibimos porque sus escalas de longitud típicas son demasiado pequeñas



Las teorías de Lovelock difieren de la relatividad general de Einstein en términos correctivos que adquieren importancia sólo cuando la curvatura del espacio-tiempo es grande

¿Cómo es posible que existan dimensiones que no percibimos en nuestra vida cotidiana? Para tratar de explicarlo, recurriremos a una analogía. Imaginemos un cable de tendido eléctrico, como los que vemos a menudo cuando viajamos por carretera. Desde lejos, nuestra visión apenas nos permite distinguir el grosor del cable, y sufrimos la ilusión de que dos de sus dimensiones espaciales no existen. De manera similar, el universo puede poseer dimensiones que no sean observables en la práctica si sus escalas de longitud típicas son pequeñísimas. Las estimaciones teóricas sobre las longitudes características de estas dimensiones las sitúan muy por debajo de los límites de resolución que podemos alcanzar con la tecnología actual. No obstante, la existencia de tales dimensiones puede tener importantes consecuencias indirectas. Por ejemplo, si todas las interacciones físicas pueden explicarse mediante una de las teorías de cuerdas, en la que se tenga en cuenta el espín de las partículas fundamentales, la dimensión del espacio-tiempo será forzosamente igual a diez.

Por otra parte, si el universo surgió de una gran explosión inicial ("big bang"), a partir de la cual empezó a expandirse, las dimensiones que observamos estuvieron contraídas a escalas ínfimamente pequeñas durante cierto período de tiempo, y en dicha época las dimensiones usuales y las adicionales hubieron de tener la misma relevancia física. Consiguientemente, cualquier intento de estudiar la evolución del universo en sus primeros estadios debería tomar en consideración la totalidad de las dimensiones existentes.

En 1970, Lovelock demostró que, si el espacio-tiempo posee realmente más de cuatro dimensiones, la relatividad general einsteiniana deja de ser la única teoría gravitatoria admisible. En honor a su autor, la familia más general de teorías que verifican las hipótesis de la relatividad general, excepto en lo concerniente a la dimensión del universo, se conocen con el nombre de teorías de Lovelock. Estas teorías contienen a la relatividad general como un caso particular y, de hecho, pueden obtenerse de las ecuaciones de Einstein añadiendo un tipo de términos muy específico, que introducen correcciones a la interacción gravitatoria cuando el espacio-tiempo está curvado.

Si el universo fuera plano, incluidas las dimensiones no observadas, las predicciones de las teorías de Lovelock coincidirían con las de la relatividad einsteiniana. Supongamos, por contra, un universo curvado ligeramente, como si fuese una enorme esfera, similar a la superficie del globo terráqueo, aunque, eso sí, con mayor número de dimensiones. En este caso, los términos que se suman a las ecuaciones de Einstein en las teorías de Lovelock son pequeñas correcciones cuantitativas que apenas alteran los resultados físicos. Imaginemos, por último, un universo muy curvado, como la esfera anterior, aunque con su radio contraído, de manera que (en el análogo de dos dimensiones empleado) parezca una bola de billar o una canica. Los términos añadidos en la gravedad de Lovelock cambian ahora por completo las leyes de evolución de la relatividad general, y las predicciones a las que conducen ambos tipos de teorías difieren radicalmente.

Si centramos nuestra atención en la posible historia del universo conocido, encontramos al menos dos situaciones en las que no está permitido despreciar su curvatura. En primer lugar, las dimensiones adicionales pueden hallarse muy curvadas, como en esferas de minúsculo radio. Por otra parte, sabemos que el universo estuvo muy comprimido cerca de la explosión original, de manera que incluso la curvatura de las dimensiones en las que nos desenvolvemos pudo haber sido importante en los primeros instantes. Debido a ello, la necesidad de sustituir la cosmología einsteiniana en cuatro dimensiones por una cosmología de Lovelock viene justificada tanto por la supuesta existencia de dimensiones adicionales como para dar cabida a toda la gama admisible de fenómenos gravitatorios en las regiones de gran curvatura.

Hasta el momento hemos restringido nuestro análisis a aspectos clásicos del campo gravitatorio. No obstante, si la gravedad está sujeta a idénticos principios cuánticos que la materia que nos circunda, esperamos que la estructura del espacio-tiempo pueda verse alterada lo mismo a diminutas escalas de longitud que a curvaturas grandes, es decir, aproximadamente en aquellas situaciones en las que la relatividad einsteiniana tradicional debería ser reemplazada por una cosmología de Lovelock. Aunque aún no se ha conseguido cuantificar satisfactoriamente la gravedad, una cuantificación formal debería proporcionar, al menos, un mejor entendimiento de la evolución del universo. Nos encontramos, en definitiva, con una jerarquía de teorías gravitatorias que prevemos cada vez más acertadas: primero, la relatividad general en cuatro dimensiones; a continuación, las teorías de Lovelock multidimensionales y, finalmente, la versión cuántica de éstas.

¿Cómo podemos construir una cosmología de Lovelock cuántica? En realidad, el procedimiento para cuantificar la gravedad no difiere conceptualmente del que se aplica en el caso de una partícula puntual, uno de los ejemplos más elementales. La trayectoria de una partícula clásica

queda determinada si se conocen su posición y velocidad en un momento dado. Las ecuaciones del movimiento fijan entonces la aceleración en dicho instante y el recorrido subsiguiente.

El estado de una partícula puede caracterizarse también mediante su posición y su momento en un cierto tiempo. Como el momento de una partícula es el producto de su velocidad y de su masa, ambas descripciones físicas son equivalentes, ya que a cada posible valor del momento le corresponde una única velocidad, y viceversa. Cuando especificamos las trayectorias usando las coordenadas de posición y velocidad decimos que empleamos la descripción lagrangiana; por contra, si sustituimos las velocidades por los momentos estamos utilizando el denominado formalismo hamiltoniano. El proceso de cuantificación resulta especialmente sencillo en la formulación hamiltoniana: basta con introducir el principio de incertidumbre de Heisenberg, que nos impide precisar simultáneamente la posición y el momento de una partícula.

En el caso de la gravedad, el papel de las coordenadas de posición lo desempeña la métrica del universo, el análogo de las velocidades le corresponde a la curvatura extrínseca, una variable que mide la variación de la métrica con el tiempo, y la generalización de los momentos la proporcionan los llamados momentos gravitatorios. Ahora bien, a diferencia de lo que sucede al analizar la dinámica de una partícula puntual, en las teorías de Lovelock cada momento gravitatorio puede conseguirse a partir de más de un valor de la curvatura extrínseca. Debido a este fenómeno, los formalismos lagrangiano y hamiltoniano dejan de ser equivalentes, y parece imposible alcanzar una descripción hamiltoniana con la que cuantificar la gravedad de Lovelock partiendo solamente de la formulación lagrangiana en la que se enuncian originalmente este tipo de teorías.

Para resolver estos problemas es necesario introducir argumentos físicos que permitan seleccionar una única curvatura extrínseca para cada momento gravitacional. La solución se obtiene al recordar que las teorías de Lovelock coinciden esencialmente con la gravedad einsteiniana, excepto en términos correctivos que son importantes sólo para curvaturas grandes.

Para la relatividad general de Einstein, incluso en más de cuatro dimensiones, existe siempre una única curvatura extrínseca compatible con el valor del momento gravitatorio. De igual forma, cuando la curvatura del espacio-tiempo es pequeña, de manera que la física descrita por la gravedad de Lovelock es casi einsteiniana, es posible asignar a cada momento gravitacional una sola curvatura extrínseca. Esta asignación puede extenderse por argumentos de continuidad según va aumentando la curvatura del espacio-tiempo. Se consigue así una relación bien determinada entre curvaturas extrínsecas y momentos gravitacionales, con la que se logra por fin una descripción hamiltoniana para la gravedad de Lovelock, adecuada para proceder a su cuantificación inmediata.

Analizando la teoría cuántica construida de esta forma, se han podido formular modelos cosmológicos en los que el universo surge aparentemente de la nada por un efecto de túnel cuántico, y en los que las dimensiones adicionales permanecen comprimidas, mientras aquellas en las que vivimos se expanden conforme a las leyes de la relatividad general, como si sólo existiesen en total cuatro dimensiones. La cosmología de Lovelock cuántica nos proporciona así una explicación de indudable sencillez y belleza sobre el origen del universo.

GUILLERMO A. MENA MARUGÁN
Instituto de Matemáticas y Física Fundamental, Madrid

Explosión cometaria

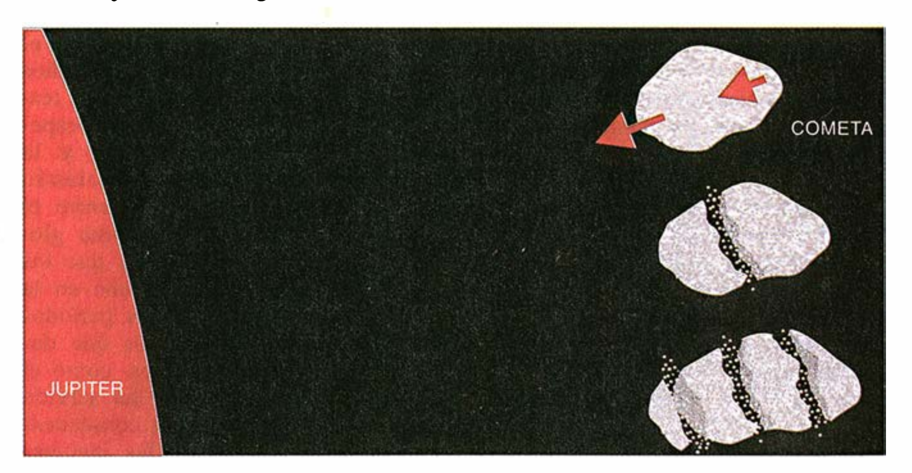
Sobre Júpiter

Shoemaker-Levy 9 es un cometa capturado por el gigantesco planeta Júpiter, cuyas fuerzas de marea han roto en pedazos al cautivo. Este mes de julio, los fragmentos del cometa explotarán en la atmósfera joviana. El fenómeno constituirá un espectáculo excepcional.

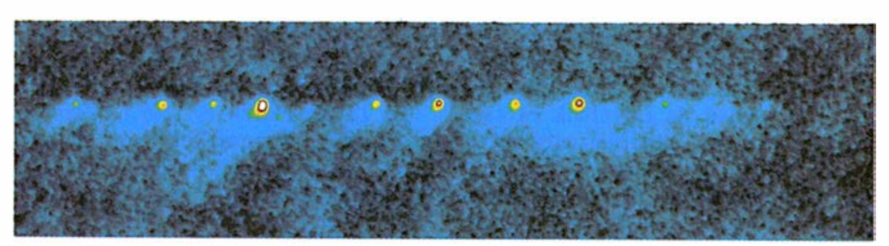
El 18 de marzo de 1993, Carolyn y Eugene Shoemaker, con David Levy, en el Observatorio del Monte Palomar, descubren el cometa que llevará sus nombres. Tiene forma aplanada. Consta de una sarta de núcleos alineados. Tras algunas semanas de observaciones, los astrónomos calculan las características de su órbita: los núcleos gravitan alrededor de Júpiter, que capturó al cometa hace probablemente una veintena de años, cuando se le acercó en el curso de su trayectoria. Siendo la órbita de Shoemaker-Levy 9 muy elongada, cada dos años el cometa se aproxima mucho al planeta gigante.

Remontándose en el tiempo, los astrónomos infieren que el cometa pasó a varias decenas de miles de kilómetros de las nubes jovianas en julio de 1992. Las enormes fuerzas de marea de Júpiter rompieron entonces el núcleo original del cometa, que se partió en una veintena de fragmentos. Estos fragmentos, propulsados a órbitas ligeramente diferentes, se mantienen ahora, separados unos de otros, en camino hacia un nuevo encuentro con Júpiter. Encuentro que será el último, porque esos distintos fragmentos penetrarán entonces en la atmósfera del planeta y en ella se desintegrarán. Es la primera vez que los astrónomos pueden predecir el choque de un objeto del sistema solar contra un planeta y se disponen a observarlo. Tardará un siglo, por lo menos, en volver a repetirse un episodio semejante.

Desde su descubrimiento, Shoemaker-Levy 9 se ha visto sometido a seguimiento óptico. Las mediciones hechas han descorrido en parte el velo que cubría a este cometa insólito. El brillo de uno de sus núcleos



Cuando un cometa pasa cerca de un planeta, la diferencia de las fuerzas de atracción gravitatoria es superior a las fuerzas de cohesión y el cometa se escinde en varios núcleos



El rosario de núcleos que constituyen el Shoemaker-Levy 9 observado en el Pic du Midi

procede de la luz solar que refleja hacia la Tierra; conocidas sus distancias a la Tierra y al Sol y la proporción de luz que tales cuerpos reflejan (su albedo), estímase su tamaño: los fragmentos mayores tienen tamaños comprendidos entre algunos centenares de metros y algunos kilómetros.

En las imágenes detectadas con el renovado telescopio espacial *Hubble* han aparecido unos cuantos fragmentos más: ahora se cuentan hasta veintitrés, rodeados de una nube de polvo resultante de la sublimación del hielo de su superficie. A esa distancia del Sol, el agua (cuya sublimación explica la actividad de los cometas próximos a nuestro astro) permanece helada, pero algunos compuestos muy volátiles, tales como el monóxido o el dióxido de carbono, se hallarían expuestos a la radiación solar tras la caza del núcleo original por Júpiter.

¿Qué pasará al producirse el choque? El primer impacto ocurrirá el 16 de julio hacia las 19h30 TU. Los impactos siguientes se escalonarán sucediéndose cada cinco o seis horas durante cinco días. Cada impacto liberará una energía equivalente a diez millones de megatones de TNT, muy superior a la de la más potente bomba atómica jamás fabricada.

Nuestros conocimientos sobre las explosiones nucleares han permitido estimar los efectos de los impactos. Al entrar en la atmósfera de Júpiter, cada núcleo explotará, emitiendo un breve e intensísimo destello luminoso. Alguna materia cometaria, transformada ya por la explosión, se depositará en las capas más hondas de la atmósfera. Después, un hongo de varios miles de kilómetros de altura se elevará por encima de las nubes jovianas haciendo subir una mezcla de materia cometaria y compuestos atmosféricos capaces de reaccionar químicamente. A continuación, se irá dispersando esa materia por los vientos jovianos en la estratosfera del planeta. Como las ondas sísmicas de un terremoto, las ondas de choque producidas por el impacto se propagarán hacia el interior del planeta haciéndolo oscilar un poco, y luego se irán atenuando hasta terminar por extinguirse.

Los impactos tendrán lugar, por desgracia, sobre la cara oculta del planeta, muy cerca del limbo de Júpiter, así que no serán visibles desde la Tierra. Habrá que esperar unos diez minutos para que la rotación del planeta nos revele el lugar de los impactos. Este acontecimiento será, no obstante, seguido por todos los grandes observatorios, así como por las sondas *Galileo* y *Ulises*, las cuales, mejor situadas, proporcionarán una visión directa del suceso. Este choque nos aclarará muchas cuestiones sobre la composición química de la atmósfera de Júpiter, sobre la circulación de las nubes en su estratosfera y sobre la estructura interna del planeta. Quizá lleguemos también a saber más sobre el tamaño y la densidad de los núcleos del Shoemaker-Levy 9.

LAURENT JORDA
Observatorio de París-Meudon

Confusión fría

Relación entre CO_2 y clima global

A los interesados por el cambio climático, los términos "dióxido de carbono" y "calentamiento global" les parecen tan inseparables como el "yin" y el "yang". Desde los años ochenta, diversos estudios sobre testigos de hielo extraídos de los espesos glaciares de Groenlandia y la Antártida han venido ofreciendo pruebas de una correlación entre el dióxido de carbono y el clima global. Mostraban esos testigos que los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera eran, durante los períodos glaciales, mucho más bajos que durante los períodos calientes, como el actual. El descubrimiento ha servido para ampliar las ominosas consecuencias que se derivan de las ingentes cantidades de dióxido de carbono que continuamos lanzando a la atmósfera.

Pero los datos de los testigos de hielo relativos al dióxido de carbono se hallan ahora bajo el fuego enemigo. En la reunión de 1993 de la Unión Geofísica Americana, Alex T. Wilson, de la Universidad de Arizona, afirmó que los registros actuales de los niveles prehistóricos de dióxido de carbono se encuentran sesgados por errores de bulto. En su opinión, los niveles de recientes períodos glaciales eran escasamente inferiores a los alcanzados en tiempos modernos y muy superiores a los admitidos.

La fuente del error estriba, según Wilson, en la técnica empleada para deducir la composición del aire miles de años atrás. Técnica que consiste en triturar una muestra de hielo antiguo para liberar las burbujas de aire aprisionadas en su interior y medir, luego, el gas que sale. El proceso, pese a su sencillez aparente, esconde bajo su epidermis una "hipótesis harto curiosa".

La técnica de trituración del hielo da buen resultado en el caso exclusivo de que el aire desprendido posea la misma composición que el que originariamente quedó aprisionado, hace milenios, bajo capas de nieve que lo cubrían. Pero Wilson observa que, en las profundidades de las capas de hielo, existe tal presión que el aire acaba por disolverse en el hielo circundante y desaparecen las burbujas.

Cuando se saca a la superficie, el hielo se descomprime y el aire reaparece en forma de burbujas o huecos en su interior. Aproximadamente una cuarta parte del dióxido de carbono queda aprisionado en el hielo y nunca aparece en las medidas registradas en el laboratorio.

En colaboración con Austin Long, también de la Universidad de Arizona, Wilson ha ideado un nuevo método para extraer el aire del hielo arcaico. Evaporan éste en una cámara de vacío (proceso de sublimación) y analizan después todo lo que sale. Sus resultados difieren bastante de los obtenidos por sus colegas. Una muestra de hielo de 35.000 años de antigüedad del Proyecto 2 de la Capa de Hielo de Groenlandia (GISP2) produjo 250 partes por millón de dióxido de carbono, ligeramente por debajo de los niveles modernos, aunque preindustriales, que se cifra en unas 270 partes por millón. Por otro lado, las técnicas al uso dan un valor de unas 180 partes por millón: una disparidad considerable.

Son muchos los que critican la técnica de Wilson. Según Martin Wahlen, del Instituto de Investiga-

ción Scripps, que también toma medidas de dióxido de carbono sobre testigos de hielo del GISP2, "de nuestros experimentos y pruebas no se desprende ninguna indicación de que pueda tener razón". Bernhard Stauffer, de la Universidad de Berna, se muestra más directo: "el razonamiento de Wilson es falso". Stauffer sospecha que la técnica de sublimación puede medir verosímilmente contaminantes del hielo o del propio aparato que den la impresión de concentraciones de dióxido de carbono artificialmente altas.

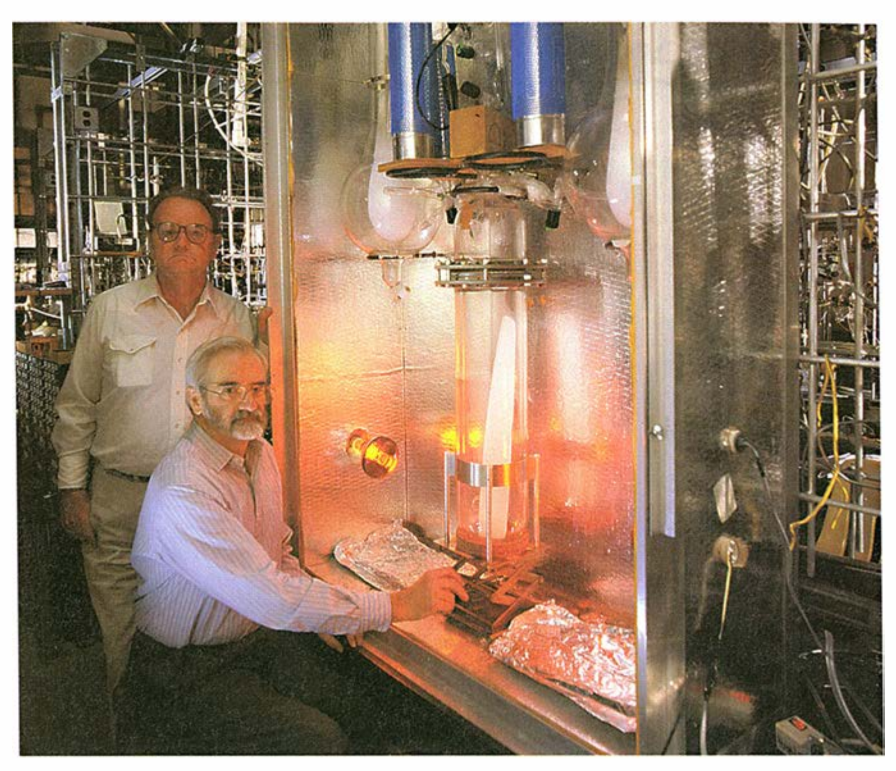
A lo que Wilson responde que los rastros de contaminación aludidos son despreciables. Y señala que sus resultados sólo discrepan de los obtenidos en la trituración del hielo cuando se trata de muestras de hielos profundos: justamente, los testigos que pertenecen a épocas en que el aire se disolvió en el hielo. Para concluir: "no cabe la menor duda de que 180 partes por millón es demasiado poco".

Stauffer, Wahlen y otros se quejan de que Wilson no se muestre explícito sobre su metodología; en particular, le reprochan que no haya enseñado a los demás los ensayos en blanco con su aparato.

Aun cuando las cifras de Wilson y Long se confirmen, no silenciarán a los que ven en el calentamiento global un serio peligro. Curt Covey, del Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore, observa que las pequeñas variaciones del dióxido de carbono entre los períodos glaciales y las eras más templadas podría significar una mayor sensibilidad del clima a las variaciones de los niveles de dióxido de carbono. Por otra parte, podría poner de relieve la influencia de otros factores. Covey sostiene que "se necesita algo más que dióxido de carbono para desencadenar períodos glaciales".

La relación entre el dióxido de carbono y los períodos glaciales está todavía lejos de verse clara. Paul A. Mayewski, de la Universidad de New Hampshire, explica que una pieza crucial de la información es la de dilucidar si las variaciones de la concentración del dióxido de carbono preceden a la iniciación del período glacial o siguen a ésta.

En otras palabras, los climatólogos no pueden todavía determinar si esas variaciones constituyen un síntoma o, por contra, una causa de los cambios ambientales en gran escala que acontecen durante los períodos glaciales. Como apostilla, con ironía, Mark A. Chandler, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales, "observar qué ocurrirá en los próximos cincuenta años será un experimento decisivo" para poner en claro la influencia del dióxido de carbono sobre las temperaturas globales.



*Aparato para medir el dióxido de carbono en núcleos de hielo, desarrollados por Alex T. Wilson (*de pie*) y Austin Long de la Universidad de Arizona*

Los testigos de hielo están aportando pruebas de un comportamiento sumamente errático del clima terrestre, comportamiento que no puede deberse por entero a la acción del dióxido de carbono y otros gases de invernadero.

El equipo de Kendrick C. Taylor, del Instituto de Investigación del Desierto de Reno, acaba de poner la guinda con su hallazgo: las temperaturas archivadas en los testigos de hielo de Groenlandia fluctuaron rápidamente durante el último período glacial, aumentando o descendiendo de forma perceptible en el curso de un decenio. Hace sólo algunos meses, el grupo de Willi Dansgaard, de la Universidad de Copenhague, minó todavía más los cimientos al mostrar pruebas de oscilaciones climáticas similares durante el último período cálido. Aunque puestos en cuestión, esos datos podrían indicar que la temperatura global experimentaría quizás otra violenta oscilación en el curso del período cálido que atravesamos.

Las fluctuaciones climáticas a corto plazo son "resultado inequívoco de variaciones de las configuraciones de la circulación atmosférica", aduce Mayewski. Lo que permanece en el terreno de las hipótesis es el mecanismo responsable de la alteración de la circulación. Mayewski atribuye la responsabilidad a las variaciones de la luminosidad solar. "Los expertos se resistían a aceptar la idea de la variabilidad solar porque carecíamos de series de datos suficientes", dice. Los análisis que se están realizando de los gases atmosféricos, polvo y otros componentes aprisionados en los testigos de hielo podrían resolver el problema.

Paul A. Mayewski confía en que un mejor conocimiento de la inconstante naturaleza del Sol permitirá determinar si los actuales aumentos antropogénicos de dióxido de carbono están compensando un enfriamiento global natural o, por el contrario, favoreciendo un calentamiento asimismo general.

Los datos de los testigos de hielo deberían, con el tiempo, facilitar el desarrollo de un modelo del clima terrestre durante las últimas decenas de miles de años. El primer paso en esa dirección consistiría en realizar mediciones precisas de todas las variables que influyen sobre el entorno global. La controversia en torno al dióxido de carbono añade un inoportuno interrogante a la tarea. "El indicarlo es parte del proceso. Con el tiempo lo resolveremos y tendremos un programa mucho más sólido", dice Taylor con optimismo.

COREY S. POWELL

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Libación cruel



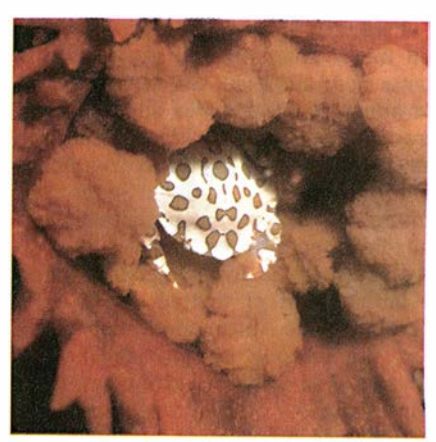




FOTO SUPERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1/80 de segundo
película: ISO = 25

FOTO DE LA IZQUIERDA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1/80 de segundo
película: ISO = 25

FOTO DE LA DERECHA
distancia focal: 28 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/80 de segundo
película: ISO = 25

Por su proximidad de forma y belleza, desde los clásicos se han llamado a las actinias anémonas de mar. Asociación que se extiende hoy a diversos aspectos de esas especies bentónicas, desde la propia denominación (son "antozoos", contracción griega de flor y animal) hasta la designación de varias de sus partes componentes, como escapo, capítulo, limbo o corona. Pero basta fijar la mirada en los poderosos tentáculos que circundan al cangrejillo polícromo para reconocer su genuina naturaleza animal; el número de esos brazos, más hechos para la defensa que para el ataque, se corresponde con la cifra de cámaras interseptales de la cavidad gástrica.

En el bosque de sus brazos había buscado refugio el vistoso portúnido de las fotografías, huyendo del alcance de calamares y pulpos, sus habituales depredadores. Para compensar su falta de movimiento, se han armado las actinias de un repertorio químico fuertemente tóxico, capaz de disuadir a posibles agresores. Con sorpresa observé que, en vez de agradecerle la hospitalidad, el braquiuro se entregó a una cruel libación, arrancándole un tentáculo. No he llegado a ver todavía qué extrae de otro de sus anfitriones frecuentes, las holoturias. ¿Serán éstas menos ingenuas?



Eficacia terapéutica de los interferones

Aunque no han resultado ser la panacea que se esperaba, se acude a los interferones en el tratamiento de enfermedades infecciosas y ciertos tumores

Howard M. Johnson, Fuller W. Bazer, Brian E. Szente y Michael A. Jarpe

En 1957, Alick Isaacs y Jean Lindenmann, del Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres, realizaron un descubrimiento que marcó época. Sabían que, cuando un virus colonizaba las células de un animal o de una placa de cultivo, la invasión bloqueaba la maniobrabilidad infectante de otros virus no emparentados. Era previsible que el sistema inmunitario del organismo, si no estaba afectado, repeliera ulteriores ataques del virus original. Pero, ¿cómo adquirirían las células resistencia ante virus que ni siquiera guardaban relación de parentesco con el primero?

Isaacs y Lindenmann demostraron que la responsable era una sustancia segregada por las células infectadas. La llamaron interferón. Demostraron también que el agente, una proteína, no interaccionaba directamente con los virus; antes bien, inducía la producción en las células enfermas (y sus vecinas) de otras proteínas que impedían la replicación de los virus invasores.

Desde entonces, se han multiplicado los estudios sobre el interferón, que han rendido descubrimientos sorprendentes, como el de que no se trata de una sola molécula. Se presenta en varias formas, capaces todas ellas de obstaculizar en cierto grado la infección vírica. Estas moléculas pertenecen a la superfamilia, cada vez más numerosa, de las citocinas o citoquinas (pequeñas proteínas que transmiten señales de una célula a otra). Y lo que reviste mayor interés, consideradas en su globalidad, son más versátiles e importantes para la salud de lo que hubiera podido preverse en los años cincuenta.

Los interferones modulan la actividad de casi todos los componentes del sistema inmunitario. Al hacerlo, refuerzan la capacidad del organismo para sofocar los ataques de la mayoría de los agentes causantes de enfermedad: parásitos, bacterias y virus. Los interferones pueden promover o impedir la diferenciación (especialización) de ciertas células. Pueden inhibir la división celular, lo que explicaría en parte por qué atentan contra la proliferación de los tumores. Recientemente, se ha comprobado, además, que una de sus formas resulta decisiva para el mantenimiento de las primeras etapas de la gestación en diversas especies animales.

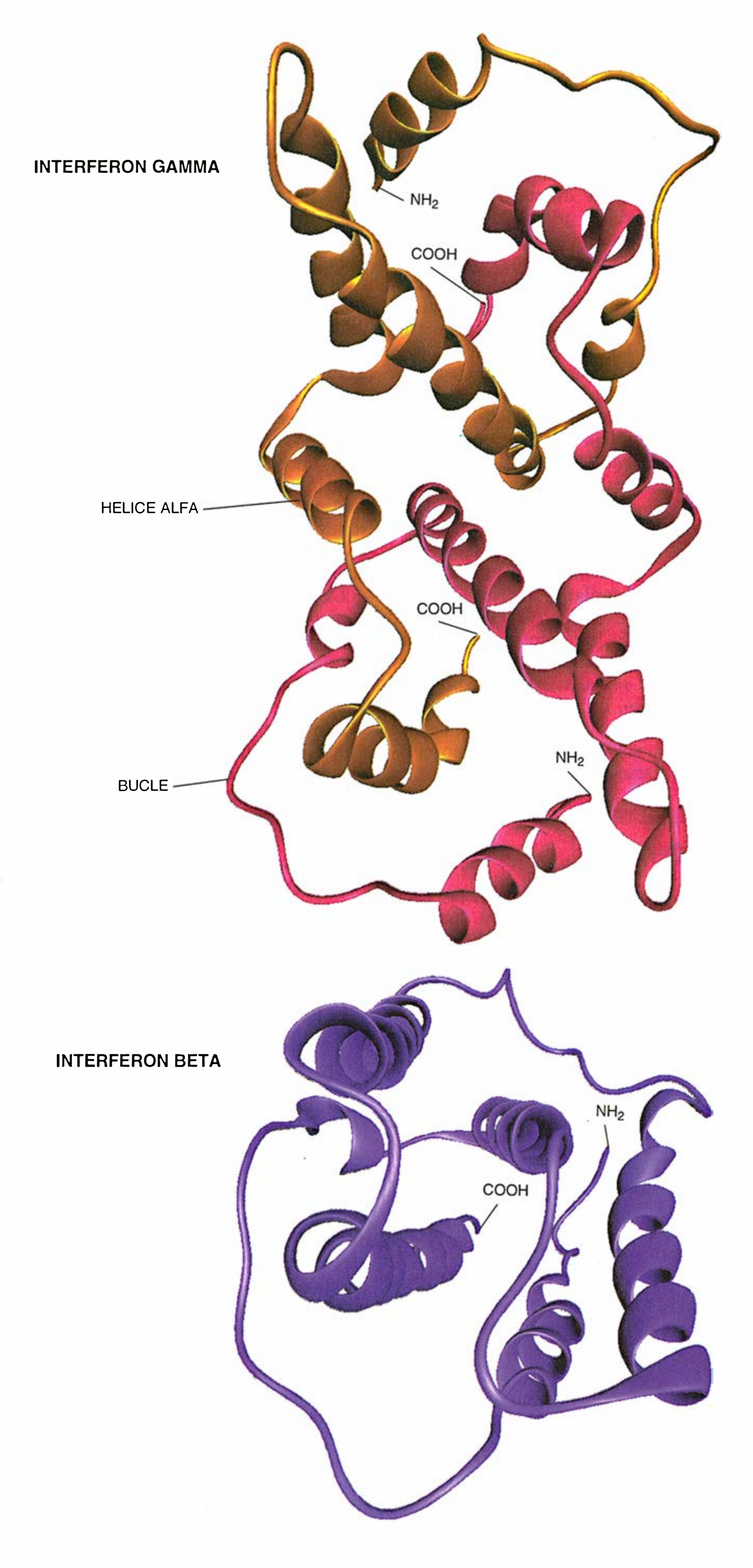
Ante ese abanico de propiedades extraordinarias, era obvio que se mirara hacia ellos en busca de posibilidades terapéuticas. Se esperaba en un principio que los interferones actuaran como balas mágicas contra una gama amplia de virus y tumores, curando sin dañar las células sanas. Esperanzas que, según vemos ahora, pecaron de utopía. No obstante, el organismo estadounidense que vela por la idoneidad de alimentos y fármacos, la FDA, ha aprobado la administración de estas proteínas para el tratamiento de siete enfermedades, entre ellas la hepatitis crónica, las verrugas genitales, el sarcoma de Kaposi y una forma de esclerosis múltiple. Prosigue la investigación sobre su aplicación en muchas otras afecciones, en especial cancerosas, como el linfoma no hogdkiniano y el melanoma maligno.

Comenzamos ya a conocer la estructura tridimensional de los interferones y a identificar los pasos centrales a través de los cuales ellos y moléculas emparentadas operan. Estos avances habrían de llevarnos en último término a la producción de fármacos más potentes y menos tóxicos. Para los biólogos, esta investigación ofrece un incentivo añadido: permiten aclarar las interacciones moleculares que utilizan otros tipos de citocinas en la regulación de la actividad celular.

La mayoría de los interferones se agrupan, de acuerdo con la secuencia aminoacídica de sus estructuras proteicas, en tres clases: alfa, beta y gamma. La familia alfa, el grupo más amplio y diverso, comprende más de 20 miembros. Sólo se han identificado una proteína beta y otra gamma. Se han descubierto también otras dos clases, omega y tau, parecidas a las variantes alfa aunque ligeramente mayores.

HOWARD M. JOHNSON , FULLER W. BAZER, BRIAN E. SZENTE y MICHAEL A. JARPE dieron un gran impulso al conocimiento de los interferones con sus trabajo de equipo realizado, años atrás, en la Universidad de Florida en Gainesville. Johnson sigue allí, en el departamento de microbiología y biología celular. Bazer es ahora titular de la cátedra O. D. Butler de la Universidad de Texas A&M. Szente prepara la tesis doctoral bajo la dirección de Johnson. Jarpe ha pasado al departamento de neurología de Cambridge.

1. ESTRUCTURAS DE DOS INTERFERONES resueltas recientemente: el gamma humano (*arriba*) y el beta de ratón (*abajo*). Las cintas representan la concatenación peptídica de las proteínas constituyentes. El interferón gamma está formado por dos moléculas idénticas (*marcadas con colores distintos*) entrelazadas; el interferón beta consta de una sola proteína, diferente de las anteriores. Los análisis estructurales permiten adentrarse en las etapas a través de las cuales los interferones cumplen su función. El equipo de Charles E. Bugg, de la Universidad de Alabama, determinó la estructura del interferón gamma; el de Yukio Mitsui, de la Universidad Tecnológica de Nagaoka, estableció la del interferón beta.



Los interferones alfa y beta comparten bastantes rasgos estructurales y funcionales; junto con las moléculas tau y omega, afines a las alfa, integran los interferones de tipo I. El interferón gamma permanece en solitario dentro del tipo II. Los del tipo I están, por regla general, mejor capacitados para inducir resistencia vírica en las células; el interferón gamma desempeña un papel más prominente en la orquestación de las maniobras defensivas del sistema inmunitario.

Ante una infección vírica, la mayoría de las células del organismo pueden producir uno u otro interferón de tipo I (el alfa, por lo común). Pero sólo dos estirpes de células, los linfocitos *T* y las células asesinas naturales (ambos del sistema inmunitario), liberan interferón gamma. Y lo hacen, no cuando ellas son infectadas, sino cuando las ponen sobre aviso la aparición de un cáncer o la presencia de virus, bacterias o parásitos en otras células. (Los superantígenos, que sobreexcitan el sistema inmunitario, y los mitógenos, agentes químicos que inducen la división de las células, estimulan también la secreción de interferón gamma por las células *T* y las células asesinas naturales.) Por último, los dos tipos de interferón se unen a receptores diferentes en las células.

¿En virtud de qué la unión de estas proteínas a sus respectivos receptores capacita a las células para combatir los virus y realizar otras funciones? Se sabe, desde hace tiempo, que los interferones, igual que otras proteínas que transmiten órdenes de una célula a otra, activan las vías de transducción de señales. Una vía de esta guisa consiste en una cascada de reacciones iniciada cuando una molécula señalizadora se une a un receptor incrustado en la membrana celular. Con la unión, la parte del receptor que mira al interior celular transmite sus mensajes a otras moléculas internas. A continuación, estas moléculas, actuando a menudo a través de una cadena de intermediarios intracelulares, expiden los mensajes a los agentes encargados de ejecutar las órdenes.

Los interferones activan las vías que inducen la transcripción, o copia, de ciertos genes a moléculas de ARN mensajero. Los transcritos de ARN, a su vez, se traducen en proteínas que bloquean la replicación vírica o producen otros efectos. Pero, ¿qué es, exactamente, lo que ocurre entre la unión al receptor y la transcripción de un gen? Se conocen ya muchos procesos intermedios, gracias en buena parte a James E. Darnell, Jr., de la Universidad

Rockefeller, y Michael David y Andrew C. Larner, de la FDA.

Las vías de señalización iniciadas por los interferones han resultado ser de una sorprendente linealidad. Esta propiedad contrasta con la complejidad de las vías activadas por la epinefrina y muchas moléculas más. La unión de estas otras moléculas a sus receptores lleva, con frecuencia a través de un circuito, a elevaciones de los niveles intracelulares de segundos mensajeros, que se mueven por el citoplasma; entre estas sustancias se numeran los nucleótidos cíclicos y determinados subproductos de la degradación de los fosfolípidos de la membrana celular. La elevación de los niveles de segundos mensajeros puede poner en movimiento cascadas potencialmente largas de interacciones moleculares, enzimáticas y de otro tipo, que desembocan en un cambio del comportamiento celular.

Las vías de transducción de las señales emitidas por los interferones no dependen de segundos mensajeros. En una nueva desviación de las vías ordinarias, las iniciadas por los interferones implican la activación de quinasas Jano. Estas proteínas, descubiertas en 1990, definen un subgrupo de las enzimas (quinasas de tirosina) que añaden grupos fosfato a los aminoácidos tirosina presentes en las proteínas. Deben su nombre al dios de la mitología romana con dos caras, porque sus miembros contienen dos centros capacitados para añadir grupos fosfato a las proteínas.

Las vías activadas por los interferones de tipo I difieren ligeramente de las activadas por el interferón de tipo II. Se admite que todos los interferones del primer tipo reconocen el mismo receptor (o receptores semejantes). El grupo de Darnell demostró en 1992 que la unión de los interferones tipo I a su receptor activa una quinasa de tirosina 2 (Tyk2), enzima que, al parecer, está unida al dominio intracelular del receptor. Más recientemente, Ian M. Kerr, de la londinense Fundación Imperial sobre Investigación Oncológica, ha demostrado que la unión al receptor activa también la quinasa Jano 1 (JAK1).

Estas quinasas no desencadenan cascadas de reacciones complicadas. Se limitan a fosforilar, por separado o en colaboración, tres proteínas: Stat113, 91 y 84. El término "Stat" es un acrónimo formado por las iniciales de *signal transducers activators of transcription*, en referencia a su poder transductor de señales, amén de ser proteínas activadoras de la transcripción (o factores de transcripción). Los números reflejan el peso molecular expresado en kilodalton. (Stat84 resultó ser poco más que una versión truncada de Stat91.)

La fosforilación de la tirosina induce la asociación de tales factores entre sí y con una proteína de 48 kilodalton. Una vez juntas, estas proteínas forman en el núcleo un complejo con determinados genes. La formación del complejo dirige, a su vez, la maquinaria de transcripción de la célula hacia la síntesis de copias de ARN mensajero de los genes a los que se ha unido. Los genes activados contienen una secuencia específica de nucleótidos en su región promotora. (El promotor de un gen opera a modo de interruptor, pues controla la iniciación de la transcripción.) En el caso de interferones de tipo I, la secuencia diana se conoce por elemento de respuesta estimulado por el interferón.

La estimulación de la transcripción génica por el interferón gamma involucra menos factores de transcripción. La unión del interferón gamma a su receptor activa dos quinasas Jano: la JAK1 (de nuevo) y la JAK2, que parece estar ligada al receptor. A continuación, estas enzimas fosforilan la misma proteína Stat91 que participa en la vía tipo I. Así decorada, la Stat91 se combina con otra proteína y probablemente con un duplicado de sí misma. Este complejo se engarza en genes cuyos promotores contienen un elemento de respuesta: el sitio de activación por el interferón gamma. Comienza la transcripción.

A medida que se iban identificando los componentes de estas nuevas vías de señalización, se exploraba la posibilidad de que hubiera secuencias cortas similares de interacciones moleculares que mediaran los efectos de otras citoquinas. La reciente avalancha de estudios realizados por el grupo de Darnell y otros indica que la unión de varias citoquinas a sus respectivos receptores activa las quinasas Jano e inicia la fosforilación de moléculas relacionadas con las proteínas Stat. Los factores de transcripción fosforilados se engarzan en elementos de respuesta localizados en los genes, muy parecidos al elemento de respuesta estimulado por el interferón y al centro de activación por el interferón gamma. Diríase, pues, que la exploración de los interferones ha sacado a la luz los elementos básicos de una vía hasta ahora desconocida que usan las células para responder con prontitud y sencillez a muchas de las señales que les llegan desde el exterior.

Cuadro de interferones

De acuerdo con sus características estructurales y otras propiedades, los interferones se dividen en dos grupos principales. Ambos tipos pueden oponerse a la replicación vírica en el interior celular y modular las actividades del sistema inmunitario. Los interferones del tipo I refuerzan mejor la capacidad de las células para resistir las infecciones, en tanto que el interferón de tipo II cumple la misión más importante en el funcionamiento adecuado del sistema inmunitario.

	TIPO I	TIPO II
TIPOS FUNDAMENTALES	Alfa y beta	Gamma
OTROS TIPOS	Tau y omega	Ninguno
ESTRUCTURA	Cadena sencilla de aminoácidos	Dímero de dos proteínas idénticas, sin relación alguna con la secuencia aminoacídica de los interferones del tipo I
PRODUCTORES PRINCIPALES	Casi cualquier célula infectada por un virus sintetizará interferón alfa; los fibroblastos son los principales productores de interferón beta	Linfocito *T* y células asesinas naturales
EFECTOS PRINCIPALES	Instan la síntesis, por células infectadas, de proteínas que inhiben la proliferación de virus y células	Promueve la actividad de componentes del sistema inmunitario que erradican tumores e infecciones en las celulas

Pero no lo sabemos todo sobre las vías de señalización activadas por los interferones. Una molécula de interferón alfa puede inducir la transcripción de un grupo de genes ligeramente diferentes de los que se transcriben en respuesta a otra de las formas de interferón del mismo grupo alfa. El modelo que va surgiendo no explica tampoco cómo clases semejantes de interferones provocan efectos divergentes. Nos gustaría dominar mejor el proceso de unión de los interferones a sus receptores, así como las etapas de la transmisión de señales: las interacciones que van desde la unión del receptor a la activación de las quinasas de tirosina.

El examen de la estructura tridimensional de los interferones ha venido a despejar algunos interrogantes. Se ha determinado ya la conformación de dos moléculas. En 1990 el grupo de Yukio Mitsui, de la Universidad Tecnológica de Nagaoka, describió la estructura del interferón beta producido por el ratón. En 1991, el equipo de Charles E. Bugg, de la Universidad de Alabama en Birmingham, pergeñó la morfología del interferón gamma de humanos.

El interferón beta (como los demás del tipo I emparentados con él) consta de una sola cadena de aminoácidos. Por contra, la forma activa del interferón gamma es un dímero, compuesto por dos copias (monómeros) de una misma proteína entrelazadas y orientadas en sentidos opuestos. Dicho con mayor precisión, los monómeros tienen un grupo amino (NH_2) en uno de sus extremos y un grupo carboxilo (COOH) en el extremo contrario. Pues bien, en el dímero, el dominio correspondiente al extremo amino (el extremo N) de un monómero interacciona con la región carboxilo terminal (el extremo C) del otro monómero.

El interferón beta y el interferón gamma comparten, pese a todo, ciertas semejanzas. Los monómeros de uno y otro se arrollan en espiral, las hélices alfa, enlazadas por bucles sencillos. Y lo que es más importante, partes de la molécula beta plegada y el dímero gamma guardan un estrecho parecido. El interferón beta se pliega de suerte tal, que una hélice de su región C terminal reposa en una especie de copa trenzada por dos hélices y sus bucles de conexión en la región del extremo N. Cuando Bugg resolvió la estructura del interferón gamma, vio un motivo estructural muy semejante. En el interferón gamma, sin embargo, la región del extremo C de un monómero se acomoda en la región del extremo N del otro.





2. MELANOMAS (*áreas negras*) inducidos en pulmón de ratón que se mantuvieron en un animal no tratado (*arriba*), en tanto que remitieron notablemente (*abajo*) en uno que recibió interferón tau. Este interferón, menos tóxico que los demás, podría ser de gran utilidad en medicina.

El diseño de modelos moleculares por ordenador puso de manifiesto que los miembros de la clase alfa poseían dicho motivo estructural. La ubicuidad de esa pauta denuncia cuán necesaria es para el funcionamiento de los interferones. Podría, quizá, capacitarles para unirse a sus receptores.

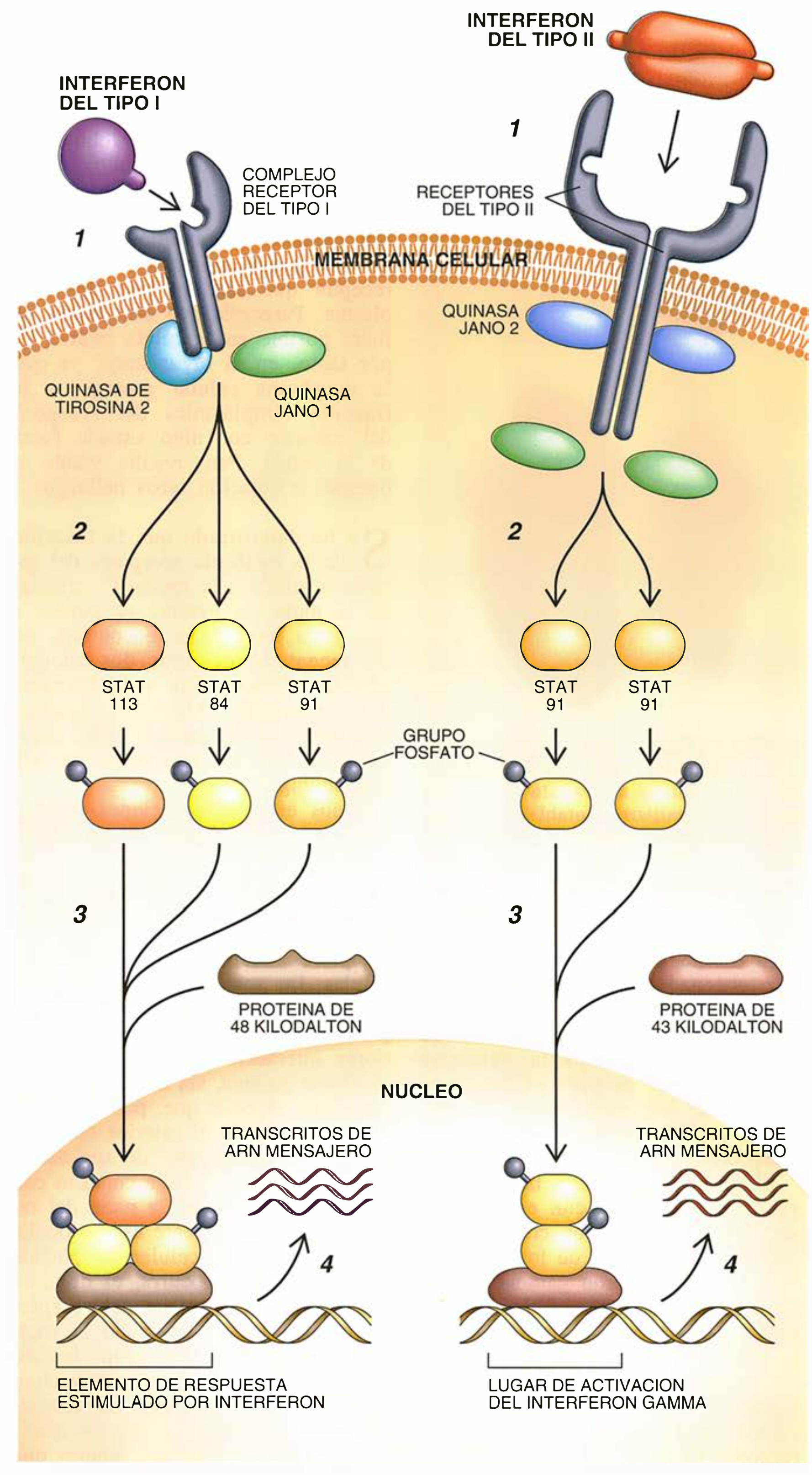
El grupo de Johnson ha aportado ya datos coherentes con esta hipótesis: péptidos sintéticos creados para remedar las regiones de los extremos N y C del interferón gamma del ratón se unen a copias libres del receptor gamma. Maria van Volkenburg ha obtenido pruebas de que el punto de alojamiento, por lo menos de la región N terminal, se halla cerca del centro de la parte extracelular del receptor. El grupo de Gianni Garotta, de la empresa Hoffmann-La Roche Pharmaceuticals de Basilea, sugirió la misma región del receptor como lugar de unión, y arribó a la conclusión de que el dímero gamma, con sus dos pares de dominios terminales N y C anidados, podría asociarse con dos receptores a la vez.

Pero, ¿en virtud de qué la unión de los receptores con la parte extracelular de los interferones termina en la activación intracelular de las quinasas de tirosina? Si tomamos juntas diversas observaciones, perfilaremos una respuesta, con el sobreañadido de una nueva sorpresa. Johnson y Szente, coautores del artículo, acaban de demostrar que, cuando se exponen las moléculas de receptor al interferón gamma, el dominio C terminal de éste puede unirse a la parte del receptor que cae del lado del citoplasma. Parecería que esta unión no fuera posible en la célula intacta (y, por tanto, en el organismo), ya que la membrana celular protege, a la fracción citoplásmica del receptor, del contacto con algo situado fuera de la célula. Pero resulta viable si traemos a colación otros hallazgos.

Se ha demostrado que la fracción de la molécula receptora del interferón unida a la región C terminal de la molécula gamma se parece a una zona intracelular encontrada en los receptores de otras dos citoquinas, la eritropoyetina y la hormona del crecimiento. Mientras permanecen inactivos, la quinasa JAK2 mantiene unidos los receptores en ese preciso lugar.

Todos estas observaciones encajan a la perfección si se tiene en cuenta que, después de la unión a sus receptores, muchas proteínas de señalización intracelular, entre ellas los interferones, son arrastradas con sus receptores hacia el interior de las células. En general, las proteínas de señalización y sus receptores se degradan o se reciclan pronto sin ulteriores interacciones. En el caso del interferón gamma, sin embargo, parece razonable suponer que, poco después de ser arrastrado al interior del citoplasma, al menos uno de sus dominios del extremo C haga contacto con su lugar de unión en la parte del receptor que previamente estaba oculta bajo la membrana celular. Es posible que, cuando esto ocurra, el dominio del extremo C desplace del receptor la proteína JAK2, liberando la enzima, que así aceptará el grupo fosfato necesario para su propia activación. Una secuencia semejante de acontecimientos permitiría a los interferones de tipo I enviar las señales que incoen su vía de transducción.

Con independencia de cómo se inicie el proceso de transducción de la señal, el resultado es la síntesis de proteínas que nos protegen de la agresión. Se han identificado ya más de 30 de las que inducen los interferones, muchas de las cuales desempeñan un papel clave en la inhibición de la replicación vírica. Y se ha



3. ACTUANTES SOBRE LA SUPERFICIE CELULAR (*arriba*), los interferones excitan genes del núcleo (*abajo*) al desencadenar una cadena, sorprendentemente corta, de interacciones moleculares de notable linearidad. En el proceso, las proteínas comienzan por engarzarse en sus respectivos receptores (*1*). Los interferones de tipo I (*izquierda*) se unen a un complejo receptor simple, mientras que las moléculas de interferones de tipo II (*derecha*) lo hacen a dos copias de un receptor distinto. En uno y otro caso, la unión activa enzimas (quinasas) que fosforilan las proteínas Stat del interior del citoplasma (*2*). Estas proteínas y otras se ensamblan entonces en distintos puntos del genoma nuclear (*3*), ensamblaje que pone en marcha la transcripción o copia de los genes unidos en moléculas de ARN mensajero (*4*), los moldes utilizados para la síntesis de proteínas.

avanzado bastante en el conocimiento de la operación de esas proteínas.

La proteína quinasa eIF-2-alfa se interpone en la maquinaria celular que los virus aprovechan para reproducirse. Los virus explotan la maquinaria de síntesis proteica de la célula huésped para traducir ARN mensajero vírico en proteínas necesarias para la síntesis de nuevas partículas infecciosas. El ARN mensajero, vírico o no, se traduce con la ayuda de los ribosomas, estructuras que cursan a lo largo de la hebra del ARN, enlazando un aminoácido tras otro a un polipéptido en crecimiento. Pero antes deben construirse los ribosomas. Varias moléculas se unen sobre el transcrito de ARN para formar la menor de las dos subunidades ribosómicas, luego se incorpora la subunidad mayor.

Los tres interferones pueden precipitar la producción de la proteína quinasa eIF-2-alfa, cuya forma activa fosforila un componente necesario para la constitución de la subunidad menor del ribosoma. Esta fosforilación bloquea la formación de la subunidad y, por tanto, interrumpe la síntesis de proteínas. La quinasa recién sintetizada se activa sólo cuando encuentra un ARN de doble hebra, que a su vez aparece en la célula en el momento en que un virus replica su material genético. Por consiguiente, la enzima bloquea la síntesis en las células infectadas, pero no en las sanas.

Entre las proteínas inducidas por los interferones de tipos I y II, se cuenta la familia de las sintetasas 2',5'-oligo (A). Estas enzimas se oponen también a la síntesis de proteínas víricas, y lo hacen activando enzimas que degradan el ARN antes de que se traduzca en proteína. Las proteínas generadas en respuesta a los interferones, muy dispares, inhiben la proliferación de una gran diversidad de virus. Algunas de las proteínas que bloquean la síntesis proteica tal vez participen también en la capacidad demostrada por los interferones de demorar el crecimiento de ciertos tumores en cultivo y en el organismo; igual que ocurre con los virus, para reproducirse las células, cancerosas o no, deben poder fabricar nuevas proteínas.

La investigación realizada desde los años setenta nos ha dado a conocer detalles no sólo de los efectos antivíricos de los interferones, sino también de la vastedad de su repertorio inmunitario. Recuérdese, entre sus efectos inmunitarios, la capacidad para incitar a las células del sistema inmuni-

tario contra los tumores. De hecho, el descubrimiento que despertó mayores esperanzas de una posible aplicación de los interferones en medicina fue la observación de que reforzaban la destrucción de las células tumorales por las células asesinas naturales. A este resultado llegaron, por separado y a finales de los setenta, Ronald B. Herberman y Julie Y. Djeu, del Instituto Nacional del Cáncer, Ion Gresser, del Instituto Pasteur, y Giorgio Trinchieri, del Instituto Wistar.

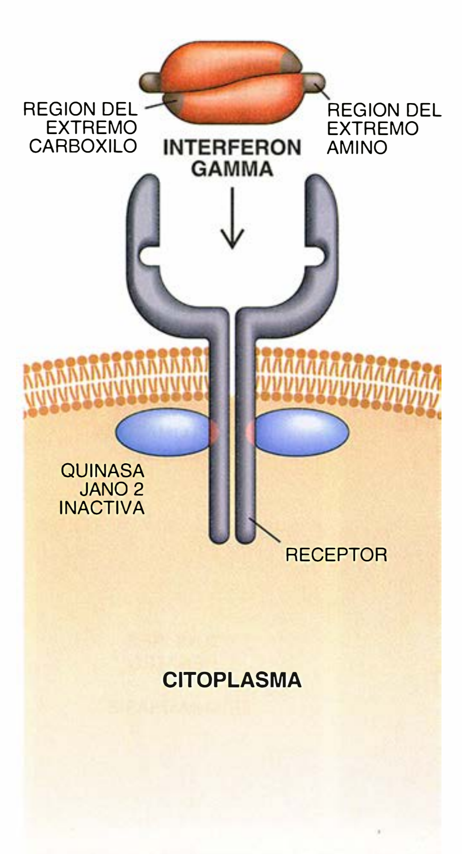
El interferón alfa se utiliza en la terapia de dos tipos de tumores, y los tres principales interferones se están ensayando en pacientes con muchas otras enfermedades malignas. Por desgracia, los médicos se ven limitados por la dosis que pueden administrar a los pacientes con cáncer o con otras enfermedades, porque el interferón alfa, y en menor grado el beta y el gamma, pueden producir graves efectos colaterales: síntomas gripales (fiebre y cansancio), así como una menor producción de células sanguíneas en la médula.

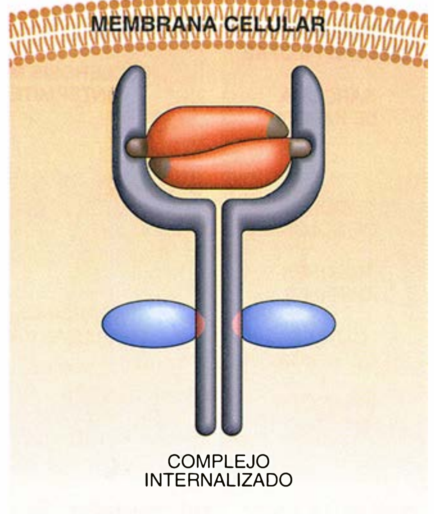
Antes incluso de que se sospechara el potencial antitumoral de los interferones, se habían roturado otras vías de las que pudieran hacer uso estas proteínas para modular las actividades defensivas del sistema inmunitario. En los comienzos de los setenta, Johnson, entonces en la FDA, descubrió, con Samuel Baron, del Instituto Nacional de la Salud, que los interferones podían influir en la actividad de los linfocitos *B*, leucocitos que segregan moléculas de anticuerpo una vez que sus receptores de superficie han reconocido proteínas foráneas, o antígenos, sobre agentes patógenos y sus productos. Los anticuerpos neutralizan directamente a los invasores o los dejan marcados para su ulterior destrucción por otros componentes del sistema inmunitario.

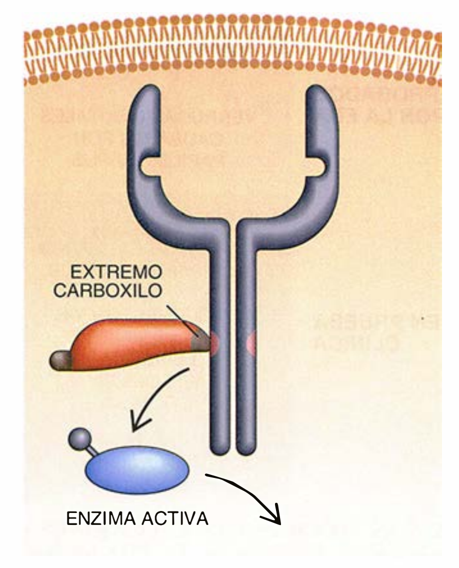
Johnson y Baron (y Gresser, por su lado) observaron que, si los interferones del tipo I actúan sobre las células *B* antes de que éstas hayan comenzado a producir anticuerpos, las citoquinas bloquean dicha síntesis. Pero si las células ya están produciendo anticuerpos, esta síntesis se intensifica. Estudios posteriores del grupo de Johnson en Florida demostraron que el interferón gamma podía regular también las actividades de las células CD8 supresoras, un subgrupo de linfocitos *T*. Estimuladas éstas por el interferón gamma, las células *T* inhiben la producción de anticuerpos por las células *B*. También retrasan la síntesis de ciertas citoquinas en otras células.

Varios descubrimientos realizados en los ochenta han revelado la existencia de una vía fundamental en la que el interferón gamma puede intensificar la respuesta inmunitaria. El equipo de Johnson y otros demostraron que el macrófago necesitaba el interferón gamma para cumplir con varias de sus funciones. Los macrófagos son leucocitos carroñeros: engullen y degradan células infectadas y microbios de todo tipo. También estimulan otras células del sistema inmunitario.

El interferón gamma puede inducir la destrucción, por macrófagos, de células tumorales y células infectadas; también puede instarles a exterminar agentes patógenos que hayan invadido células carroñeras. Además, estimula en los macrófagos la producción de moléculas de clase II del MHC (complejo principal de histocompatibilidad). Después de haber ingerido los agentes patógenos, los macrófagos degradan en su interior los microorganismos y encajan los fragmentos en surcos de las moléculas de MHC, que se acarrean hasta la superficie celular. Allí exponen los fragmentos antigénicos a las células *T* CD4. (Estos linfocitos pueden "ver" los antígenos sólo si los fragmentos foráneos forman complejo con una molécula MHC de clase II.) Una vez reconocidos los antígenos, las células CD4 proliferan y liberan sustancias químicas que ayudan a otras células del sistema inmunitario a rechazar las infecciones.







4. ESCENARIO PROPUESTO por Johnson y Szente para resolver la importante cuestión siguiente: ¿De qué forma se produce la activación de la enzima quinasa 2 de tipo Jano (JAK2) en el interior de la célula tras la unión del interferón gamma a sus receptores en la superficie celular (*izquierda*)? Se sabe que, después de la unión, el complejo compuesto por el interferón y su receptor es arrastrado hacia el interior del citoplasma (*centro*), donde el primero acaba degradándose. Al poco de producida la internalización, la región del extremo carboxilo de un fragmento, o la molécula íntegra del interferón, podría unirse al receptor (*derecha*) en un sitio (*área roja*) que al principio estaba inaccesible en el citoplasma. Esta unión, a su vez, podría desplazar la JAK2 del mismo sitio, dejándola así en libertad para actuar sobre otras proteínas.



5. FABRICACION de interferones, convertida en práctica rutinaria gracias a la ingeniería genética. El técnico vigila uno de los tanques utilizados en la fabricación industrial de interferón gamma.

Los datos acumulados refuerzan la idea de que el interferón gamma, sintetizado fundamentalmente en respuesta a infecciones celulares y tumores, se comporta a modo de interruptor inmunitario. La proteína ayuda a activar el brazo, mediado por células, del sistema inmunitario, compuesto por macrófagos, diversos tipos de células *T* y otras células que responden a los microorganismos escondidos en el interior celular de distintos tejidos. El interferón gamma puede, asimismo, atenuar la producción de anticuerpos, mejor adaptados para erradicar agentes patógenos que establecen colonias en el exterior celular.

El cuadro de virtudes de los interferones trasciende la inmunidad. Pueden regular la diferenciación de ciertas estirpes celulares, los fibroblastos entre ellas. Los fibroblastos sintetizan colágeno, una proteína fundamental del tejido conjuntivo. Sin embargo, algunos fibroblastos crecidos en cultivo pueden verse obligados a transformarse (diferenciarse) en adipocitos en presencia de glucosa e insulina. El equipo de Livia Cioé, del Instituto Wistar, y Sidney E. Grossberg, de la Facultad de Medicina de Wisconsin, observaron que esa diferenciación puede bloquearse con interferones de tipo I. Este trabajo pone sobre el tapete una cuestión que aguarda respuesta: ¿influye el interferón gamma en la cantidad de lípidos del organismo?

El interferón cumple un papel en la reproducción. Suele ocurrir que, para que el embarazo progrese, el cuerpo lúteo, estructura que envuelve al óvulo antes de la fecundación, tiene que sobrevivir y segregar progesterona durante un largo período. En la mujer, la gonadotropina coriónica humana, sintetizada por la placenta en desarrollo, evita que el organismo destruya prematuramente la placenta. En vacas, ovejas y cabras, la capa más externa (el trofoblasto) de las membranas que rodean al embrión segrega cantidades copiosas de trofoblastina, para proteger el cuerpo lúteo.

En 1993 Kazuhiko Imakawa, de la Universidad de Kansas, y R. Michael Roberts, de la Universidad de Missouri, determinaron la secuencia aminoacídica de la trofoblastina de oveja, que uno de nosotros (Bazer) había aislado en 1982. La secuencia era muy semejante a la del interferón alfa. Viose luego que éste y la trofoblastina se unían al mismo receptor. De ambos fenómenos podemos inferir que la trofoblastina es un interferón. Pero, ¿posee actividad antivírica?

Pues sí. Bazer, Johnson y Carol H. Pontzer han establecido que la proteína inhibe la replicación vírica con una eficacia pareja a la de los interferones conocidos; ha pasado así a constituir el interferón tau, por su origen en el trofoblasto. Se desconoce la función que el interferón tau desempeña en el organismo humano.

El interferón tau inhibe la enzima transcriptasa inversa en las células infectadas por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), agente del sida. (El VIH produce transcriptasa inversa para leer sus genes en el ADN de la célula hospedadora.) El interferón tau bloquea también la división de células tumorales en cultivo. Pero su cualidad más interesante, desde una óptica médica, reside en la escasa toxicidad. Mientras dosis altas de otros interferones pueden dañar las células en cultivo, dosis igualmente altas de interferón tau no parecen tener el mismo efecto. La baja toxicidad de ese interferón sugiere que la versión humana podría llegar a ser algún día una alternativa más segura y potente de los otros interferones.

Pese a sus limitaciones, los interferones gozan de la consideración de fármacos útiles. Y es muy posible que sus aplicaciones se amplíen con el progreso de la investigación. El interferón alfa es el de uso más generalizado. Lo aprobó, en 1986, la FDA para el tratamiento de la leuce-

	INTERFERON ALFA		INTERFERON BETA	INTERFERON GAMMA
APROBADOS POR LA FDA	HEPATITIS CRONICA "B" Y "C" VERRUGAS GENITALES CAUSADAS POR PAPILOMAVIRUS	LEUCEMIA DE CELULAS PILOSAS SARCOMA DE KAPOSI	ESCLEROSIS MULTIPLE INTERMITENTE	ENFERMEDAD GRANULOMATOSA CRONICA
EN PRUEBA CLINICA	POLIPOS EN LA FARINGE CAUSADOS POR PAPILOMAVIRUS INFECCION POR VIH LEUCEMIA MIELOGENA CRONICA LINFOMA NO HODGKINIANO	TUMORES DE COLON TUMORES RENALES CANCER DE VEJIGA MELANOMA MALIGNO	CARCINOMA DE CELULAS BASALES	TUMORES RENALES LEISHMANIASIS

6. SON MUCHAS LAS AFECCIONES que reciben ya tratamiento con interferones. La FDA ha aprobado su uso en siete enfermedades. Se están realizando ensayos clínicos sobre la aplicación de los interferones en diversas más (*ilustración*).

mia de células pilosas (una rara enfermedad maligna). Tomado a bajas dosis, consigue una remisión significativa del cáncer en alrededor del 90 por ciento de los pacientes, que deben seguir tomándolo indefinidamente para evitar recidivas.

En 1988 se admitió también el interferón alfa para tratar las verrugas genitales transmitidas por vía sexual, que crecen como resultado de la infección por papilomavirus. La inyección del fármaco en una verruga o bajo la piel que la rodea consigue su eliminación hasta en un 70 % de los pacientes que no responden a otros tratamientos. A diferencia de la crioterapia o de la cirugía, el interferón alfa no es cáustico, ni deja cicatriz.

En ese mismo año la FDA extendió la aprobación de su uso al sarcoma de Kaposi, cáncer muy frecuente en individuos infectados por el VIH; por desgracia, alrededor del 30 por ciento de los pacientes que reciben interferón alfa lo abandonan a causa de los efectos secundarios consecutivos a las elevadas dosis requeridas. Algunos datos, sin embargo, parecen indicar que la administración de interferón alfa con zidovudina (AZT), o con otros análogos de nucleósidos utilizados para combatir el VIH, potencia el efecto del fármaco. Tal vez este sinergismo elimine la necesidad de emplear dosis elevadas. (Hay indicios de que el interferón alfa combinado con el tamoxifén puede ser más eficaz en el tratamiento del cáncer de mama que cualquiera de los dos fármacos por separado.)

Los enfermos de hepatitis se han beneficiado también del interferón alfa. Antes de que en 1991 se autorizase su empleo en casos de hepatitis crónica C (hepatitis no A, no B), no se disponía de terapéutica eficaz contra esta infección vírica contagiosa del hígado. Ahora, un tratamiento de seis meses puede eliminar los síntomas, y se están adoptando períodos de tratamiento más prolongados para evitar recidivas. En 1992 el interferón alfa se convirtió también en el primer tratamiento aprobado de la hepatitis B, que afecta a unos 300 millones de personas en todo el mundo. Se necesitaba con urgencia alguna terapia para estas enfermedades que suelen desembocar, dejadas a su albur, en cirrosis y cáncer hépatico.



7. LELA RECTOR, de Marion en Illinois, ganó el premio el año pasado en una curiosa lotería. Después de que la FDA aprobara en julio de 1993 el uso de un forma del interferón beta en el tratamiento de la esclerosis múltiple, la demanda sobrepasó con creces la producción. De modo que los Laboratorios Berlex, que lo distribuían, organizaron una lotería entre 67.000 pacientes. Rector, que sacó el número 109, fue una de las 30.000 personas que reciben el tratamiento.

El interferón gamma y el beta han entrado también en la farmacopea. El interferón beta se receta en el tratamiento de la forma intermitente de la esclerosis múltiple, en la que los síntomas vienen y van. La esclerosis múltiple es una enfermedad autoinmunitaria. Macrófagos, células *T* y células *B* colaboran en la destrucción de las vainas de mielina que protegen las fibras nerviosas del sistema nervioso central. La degradación de la mielina genera muchos síntomas: visión doble, pérdida de equilibrio, debilidad muscular y parálisis, entre otros. No acabamos de saber por qué el interferón beta alivia los síntomas, pero pudiera ser a través de la supresión directa o indirecta de las células del sistema inmunitario. Sí está comprobado que su aplicación atempera la frecuencia de los episodios.

Se recurre al interferón gamma para combatir la enfermedad granulomatosa crónica, afección hereditaria en la que los granulocitos (unos leucocitos) ingieren las bacterias, pero son incapaces de destruirlas. Los pacientes sufren infecciones graves y repetidas en la piel, hígado, ganglios linfáticos, pulmones y hueso. Se administra con fines profilácticos, a menudo en combinación con antibióticos. Se piensa que actúa en parte estimulando la capacidad de los macrófagos para destruir bacterias.

De las muchas otras aplicaciones que están en fase de ensayo clínico, reviste particular interés el uso del interferón gamma para combatir la leishmaniasis, enfermedad ulcerosa producida por infección de los macrófagos (a menudo los de la piel) por el parásito leishmania, frecuente en regiones de Africa, América del Norte y del Sur, Europa oriental y meridional, y Asia. Los estudios clínicos respaldan la hipótesis de que el interferón gamma, solo o en combinación con agentes antiparasitarios, controla y, a veces, cura la enfermedad.

Se conoce incluso el mecanismo de acción. El equipo de Juana Wietzerbin, del Instituto Curie de París, ha demostrado que el interferón gamma estimula la producción de óxido nítrico en los macrófagos infectados por el parásito, óxido que resulta ser muy tóxico para la leishmania; también desempeña un papel importante en la eliminación de algunos virus.

Considerada en su conjunto, la investigación sobre los interferones ha experimentado un impresionante progreso desde 1957. Conocemos ya la estructura de las moléculas y tenemos bastante idea de cómo actúan. Sabemos también que la inhibición del crecimiento de los virus no es más que una de las muchas funciones esenciales de los interferones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF RECOMBINANT HUMAN INTERFERON-γ. Steven E. Ealick, William J. Cook, Senadhi Vijay-Kumar, Mike Carson, Tattanahalli L. Nagabhushan, Paul P. Trotta y Charles E. Bugg en *Science*, vol. 252, págs. 698-701; 3 de mayo de 1991.

EARLY EVENTS IN SIGNALLING BY INTERFERONS. Sandra Pellegrini y Chris Schindler en *Trends in Biological Sciences*, vol. 18, págs. 338-342; septiembre de 1993.

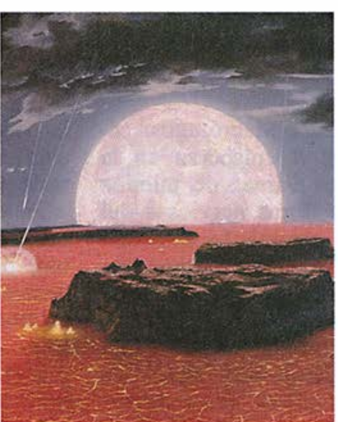
THE MOLECULAR CELL BIOLOGY OF INTERFERON-γ AND ITS RECEPTOR. Michael A. Farrar y Robert D. Schreiber en *Annual Review of Immunology*, vol. 11, págs. 571-611; 1993.

Visiones astronómicas de Chesley Bonestell

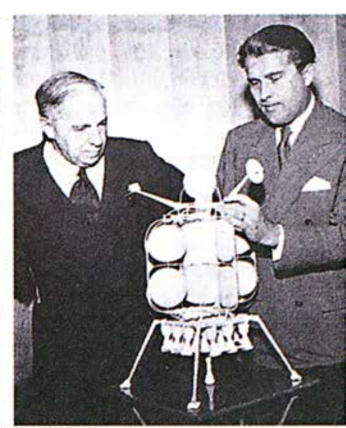
La excepcional combinación de conocimientos técnicos y expresividad gráfica de este artista infundió vida en la astronomía y facilitó el avance del programa de vuelos espaciales tripulados

Ron Miller









Chesley Bonestell, pintor e ilustrador, nació el 1 de enero de 1888, 15 años antes del vuelo de los hermanos Wright y 38 del lanzamiento del primer cohete propulsado por combustible líquido. Cuando falleció, 98 después, el hombre había puesto el pie en la Luna y la mayoría de los planetas del sistema solar habían sido visitados por ingenios robóticos. Los cuadros de paisajes y exploraciones que Bonestell pintó no sólo fueron una prefiguración de los grandes éxitos del siglo XX, sino que contribuyeron también a que se produjeran. La atención que concedió al realismo pictórico y técnico hizo cambiar la idea popular sobre vuelos espaciales, trocándolos de fantasía en una posibilidad inmediata o en una certeza cercana.

Bonestell procedía de una familia de clase media de San Francisco. Manifestó desde edad muy temprana un ávido interés por la astronomía y por la pintura. Comenzó a dibujar a los cinco años e inició una formación artística académica a los doce. Tenía diecisiete cuando visitó el Observatorio Lick; lo que contempló a través del gran telescopio de 30 centímetros y de los gigantescos refractores de 95 cm le inspiró y apasionó. Nada más volver a casa, dibujó un boceto del Saturno que había observado. Aquél pudo ser su primer escarceo en pintura espacial.

Sin embargo, Bonestell aplicó originalmente sus destrezas visuales en arquitectura. Estudió algunos años en la Universidad de Columbia, y aunque no llegó a graduarse, sí superó el examen de capacitación del Colegio de Arquitectos del estado de California. En 1911 trabajaba de dibujante de planos de aspecto y vistas generales para Willis Polk, un arquitecto innovador, de quien pronto fue proyectista principal.

Estando con Polk, Bonestell preparó planos de aspecto para el Paseo de las Diecisiete Millas en Pebble Beach (California) y realizó proyectos de tipo decorativo, dentro de un ambicioso plan de urbanización de la península de Monterrey. En 1927 ayudó a William van Alen en el diseño del edificio Chrysler de Nueva York. Posteriormente delinearía planos de detalle para otro de los grandes monumentos de Estados Unidos: el puente de Golden

1. LA IMAGINACION DE CHESLEY BONESTELL dio vida a mundos lejanos y a tecnologías no natas. Vemos arriba (*de izquierda a derecha*): un rastro de corrientes de gas procedentes de la estrella doble Beta Lyrae; la ascensión de la Luna sobre una Tierra joven, en estado de fusión; un cohete alado desprendiéndose de su tercera fase; y a Bonestell con Wernher von Braun (*derecha*), que contribuyó a llevar a cabo el programa norteamericano de vuelos espaciales tripulados. La experiencia cinematográfica de Bonestell le fue muy útil para plasmar impresionantes escenarios astronómicos, como esta vista de los astronautas explorando Mimas, un satélite de Saturno (*página contigua*).

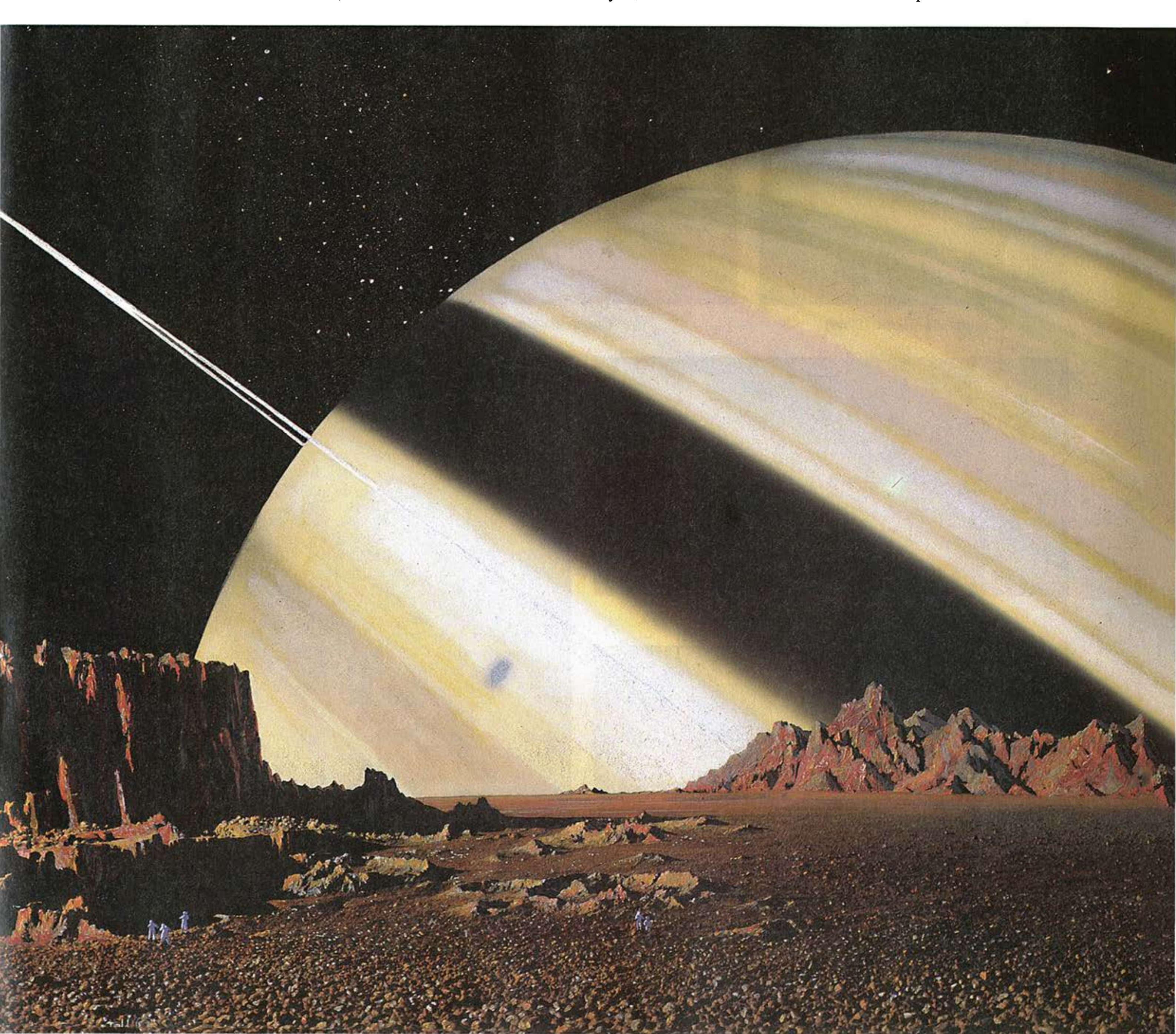
RON MILLER, profesor de la Universidad Internacional del Espacio en Cambridge (Massachusetts), tiene en su historial una extensa obra de ilustrador científico. Se graduó por el Instituto Columbus de Artes y Oficios de Ohio, en 1970. Autor o coautor de una veintena de libros, suya es también una nueva versión al inglés de las *20.000 leguas de viaje submarino* de Julio Verne.

Gate, en San Francisco. Hacía un hueco en su floreciente carrera en arquitectura para dibujar paisajes lunares o marcianos, que regalaba a sus familiares y amigos.

En 1938, cumplidos los cincuenta, Bonestell se trasladó a Hollywood y dio comienzo a una carrera muy distinta, sumamente lucrativa: pintor de decorados y efectos especiales para el cine. La primera película en la que trabajó fue *Ciudadano Kane*, de Orson Welles. Todas las vistas de la Nueva York finisecular y de la mansión de Charles Foster Kane, Xanadú, son obra suya. Bonestell intervino en filmes de todos los grandes estudios a lo largo del decenio siguiente; acabó siendo el artista decorador mejor pagado de la industria cinematográfica. En el decenio de 1950 regresó a Hollywood para preparar los decorados de varios filmes de ciencia-ficción producidos por George Pal, entre los que se cuentan *Destino: la Luna* y *La guerra de los mundos*.

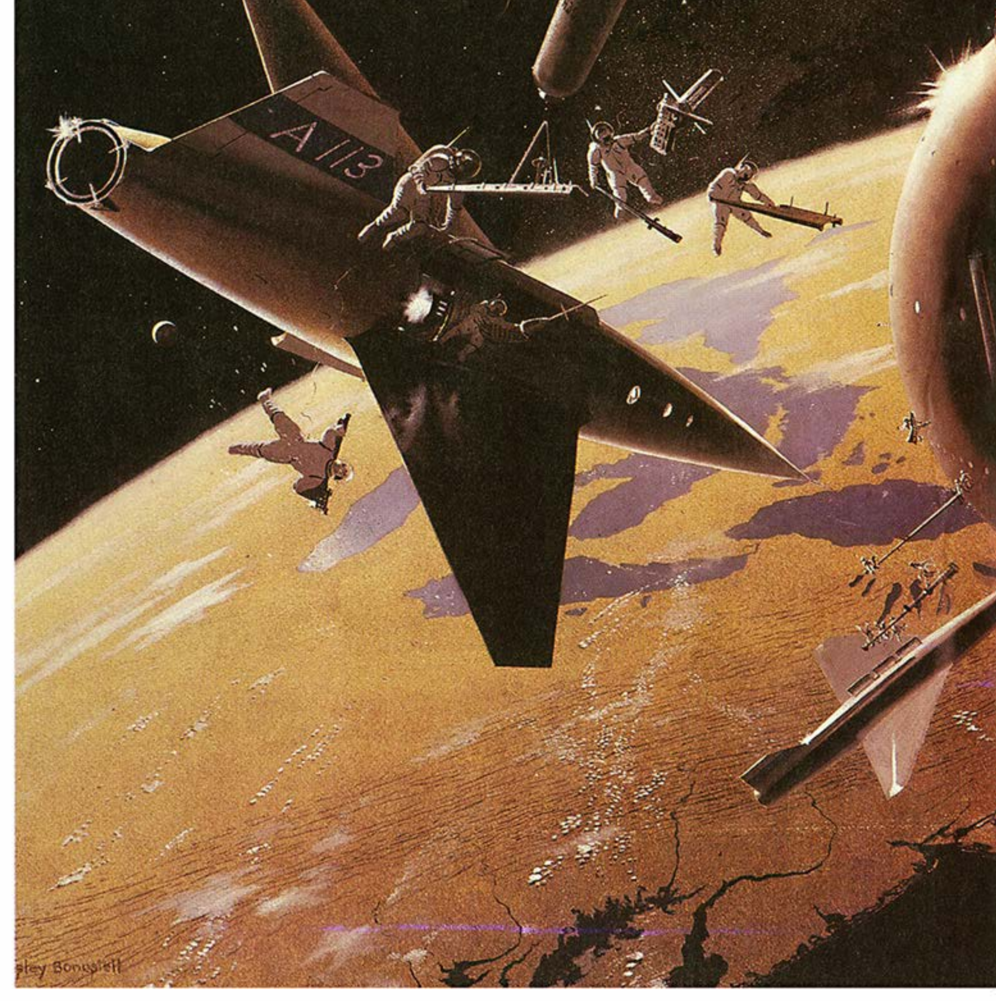
Merced a una serie de inversiones cuidadosas, Bonestell consiguió cierta tranquilidad económica; su mente pudo retornar a su escondido amor, la ilustración astronómica. La destreza adquirida en su trabajo cinematográfico le sirvió de inspiración. En la introducción de su libro *The Conquest of Space*, publicado en 1949, recordaba: "Al ir ampliándose mis conocimientos sobre los aspectos técnicos de la industria del cine me di cuenta de que podía aprovechar los cambios de ángulo que se utilizan en cinematografía para ilustrar el 'viaje' de un satélite a otro, mostrando a Saturno exactamente como sería visto, y darle al mismo tiempo mayor interés presentando al fondo los satélites interiores o exteriores, así como al planeta en diferentes fases." Estas reflexiones tomaron forma visible en una serie de láminas publicadas en *Life* en el número del 29 de mayo de 1944, que dejaron atónitos a los lectores.

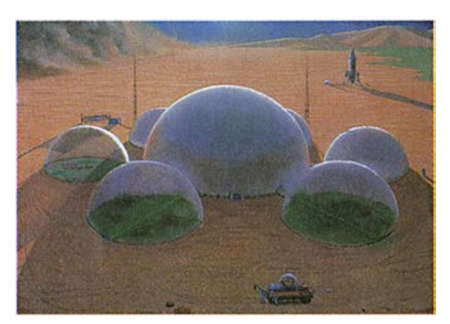
Por entonces comenzó una duradera colaboración con un expatriado alemán, Willy Ley, historiador y divulgador científico, que había sido miembro de la *Verein für Raumschiffahrt* (Sociedad de Viajes Espaciales). Por consejo de Ley, Bonestell empezó a añadir naves espaciales a sus dibujos. *Life* publicó en 1946 otra serie de ilustraciones suyas, mostrando esta vez un vuelo tripulado a la Luna.





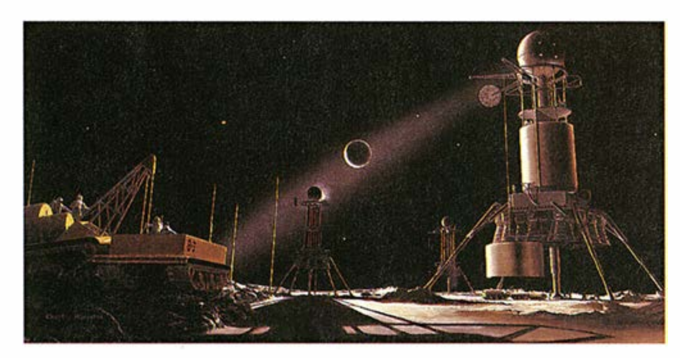
Pequeño satélite (1953)



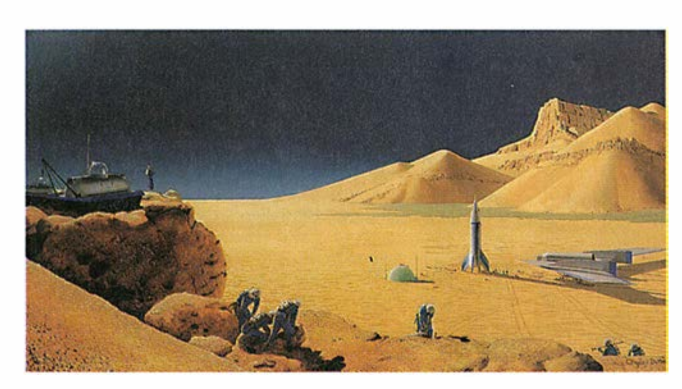


Colonia marciana (1964)

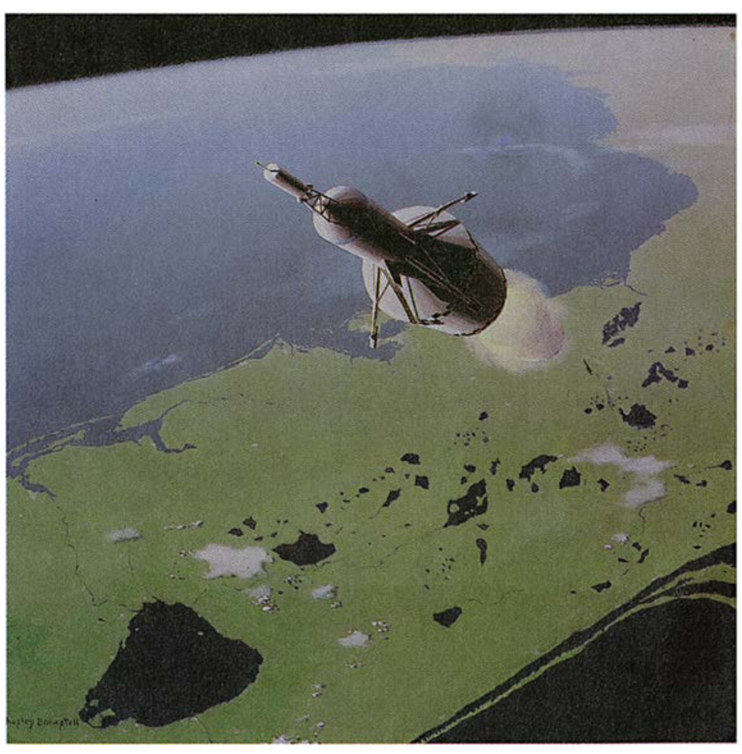
Construcción de una estación espacial tripulada (1949)



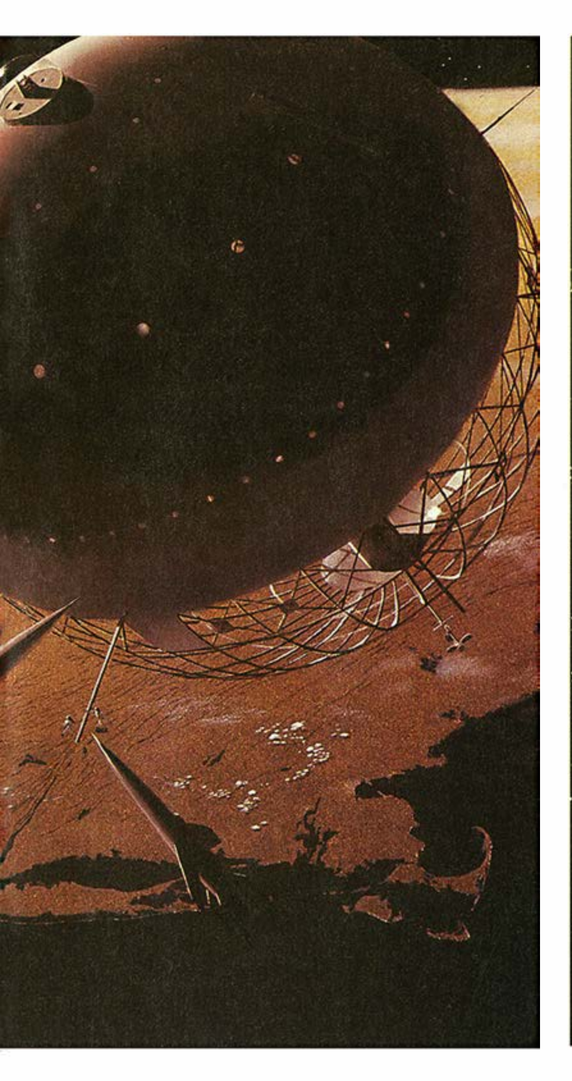
Expedición lunar (1953)



Base en Marte (1956)



Lanzamiento de un cohete sobre Florida (1962)





Descenso sobre la Luna (1953)

2. LOS VUELOS ESPACIALES fueron uno de los grandes temas de Bonestell, sobre todo en los años cincuenta. Algunas de estas imágenes, como el lanzamiento sobre Florida, el satélite no tripulado y los descensos sobre la Luna, son prefiguración cercana de naves espaciales reales. Otras, como las de las bases en la Luna y en Marte, todavía pertenecen al futuro.

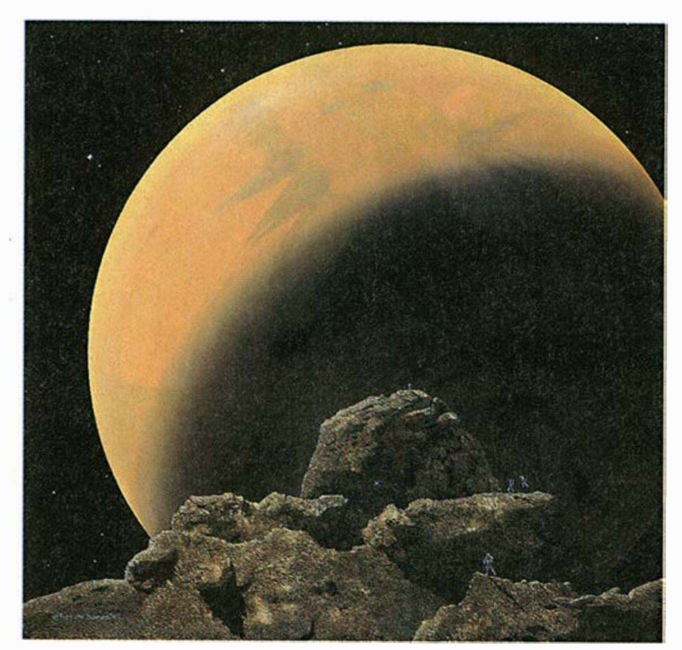
Los paisajes espaciales imaginados por Bonestell no tardaron en aparecer en un número cada vez mayor de revistas. En 1948, el número de noviembre de *Scientific American* exhibía en la portada una lámina suya, que mostraba al Sol visto desde Mercurio. Tanta popularidad alcanzaron sus trabajos que, en una ocasión, el artista envió inadvertidamente el dibujo de portada de una revista de ciencia ficción a otra publicación del género. El editor de ésta se apresuró a publicarla.

Su primer libro, *The Conquest of Space*, exhibía 48 láminas asombrosas, acompañadas por textos de Ley. Arthur C. Clarke, autor de obras científicas y de ciencia-ficción, decía en un comentario crítico para *The Aeroplane*: "La notable técnica de Bonestell produce en sus pinturas un efecto de realismo tan llamativo que en ocasiones han sido confundidas con fotografías auténticas en color por quienes sólo están ligeramente familiarizados con el estado actual de los vuelos interplanetarios... Es probable que en los años venideros sean muchas las imaginaciones que encienda y, en consecuencia, que cambien muchas vidas."

Durante la primera mitad del decenio de 1950, Bonestell entró en una fase frenética de actividad creadora, que corroboró la profecía de Clarke. En 1951, Cornelius Ryan, director adjunto de la revista *Collier's*, invitó a Bonestell a ilustrar una serie de cinco artículos sobre el futuro de los vuelos espaciales. El autor principal era Wernher von Braun, experto de máxima reputación en cohetes. Bonestell y von Braun llegaron a ser buenos amigos y colaboraron estrechamente en el desarrollo de ideas para naves espaciales tripuladas.

El propio von Braun quedó impresionado por el buen ojo que Bonestell tenía para la exactitud científica e ingenieril. Según escribiría años después: "Las pinturas de Chesley Bonestell... son mucho más que reproducciones de hermosas y etéreas pinturas de los mundos del más allá. Presentan el retrato más exacto de aquellos lejanos cuerpos celestes que la ciencia moderna puede ofrecer. No digo esto a la ligera. En mis muchos años de asociación con Chesley he aprendido a respetar, y aun a temer, esta maravillosa obsesión del artista por la perfección. Mi armario archivador está repleto de bocetos de cohetes que yo le hacía a modo de apunte para sus ilustraciones; me los delvovía con penetrantes cuestiones de detalle o críticas lacerantes por culpa de alguna incoherencia o algún descuido."

Los artículos de *Collier's*, publicados entre 1952 y 1954, se ganaron al público. El país se obsesionó por las aventuras espaciales; aparecieron reproducciones o imitaciones de las pinturas de Bonestell en contextos que iban desde los anuncios publicitarios hasta las cajas del al-



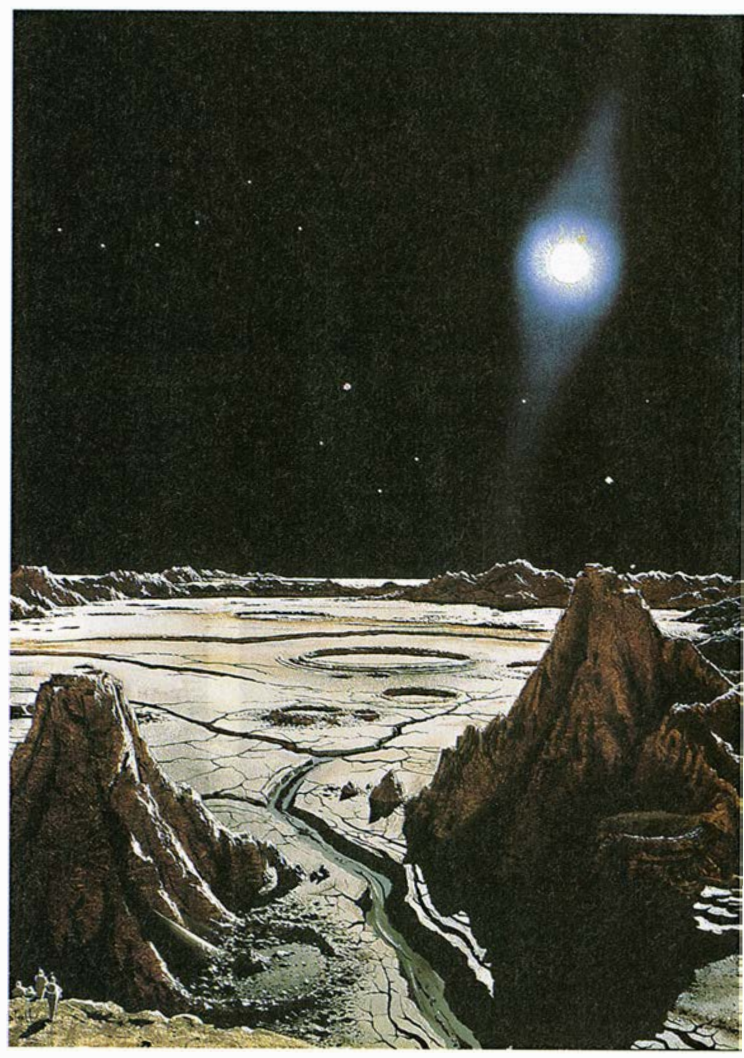
Marte visto desde Fobos (1949)



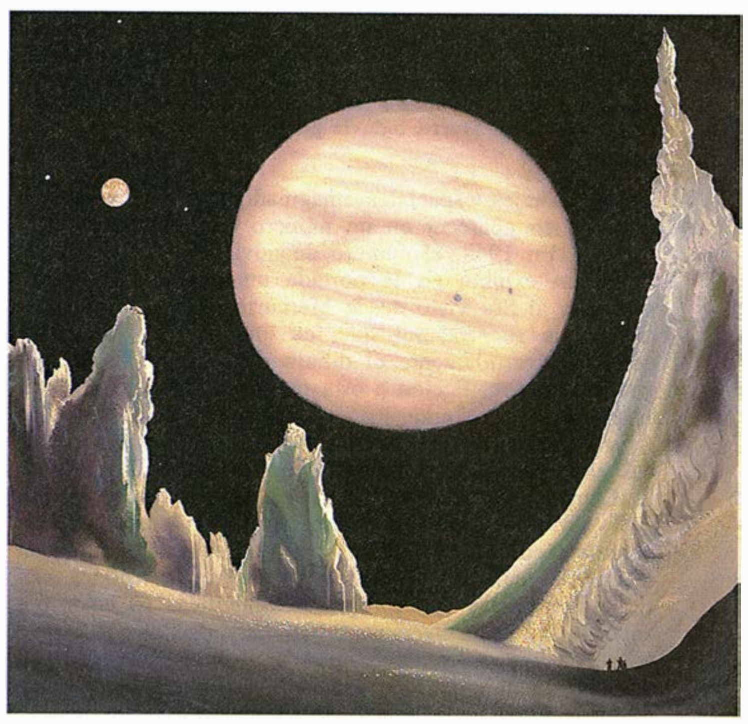
Superficie de Venus (1949)



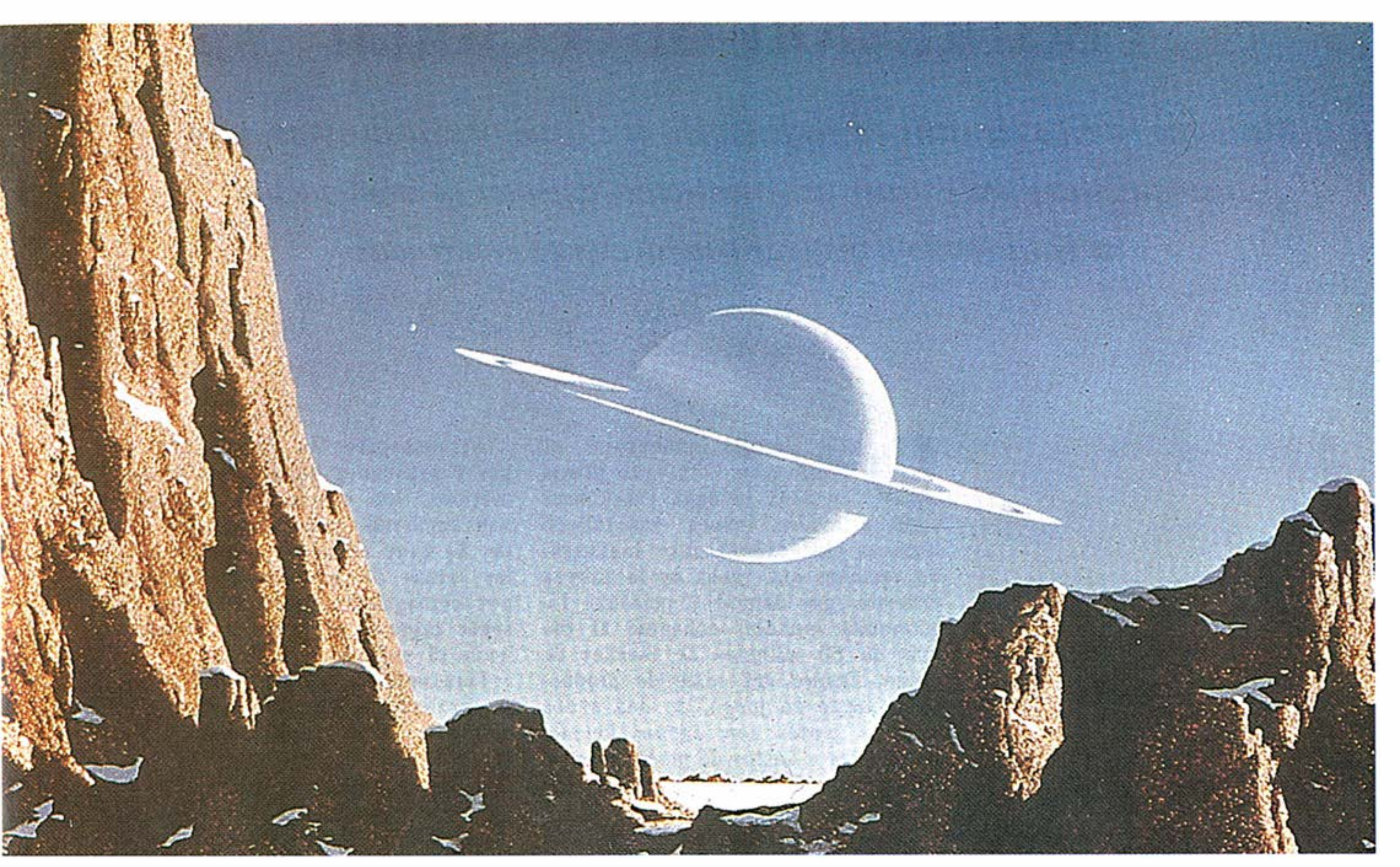
Superficie de Plutón (1949)



Superficie de Mercurio (1948)



Júpiter visto desde Europa (1948)



Saturno visto desde Titán (1952)

3. EN MANOS DE BONESTELL, los mundos del sistema solar se convirtieron en paisajes escarpados, reminiscentes de las pinturas de la Hudson River School. Aunque muchos detalles concretos de estas obras (como los cielos despejados de Titán y lo escarpado y abrupto de las montañas, por ejemplo) están en contradicción con descubrimientos científicos recientes, Bonestell consiguió evocar con eficacia los detalles esenciales y la exótica rareza de los otros planetas y sus satélites.

muerzo de los escolares, pasando por los programas de televisión. Al concluir, la serie de *Collier's* fue reconvertida en una tríada de libros extraordinariamente populares: *Across the Space Frontier*, *Conquest of the Moon* y *Exploration of Mars*.

El trabajo pictórico de Bonestell pesó, ganado el público, para que el gobierno apoyase inversiones en exploración espacial. Aunque los viajes espaciales eran ya tema familiar en el decenio de 1950, al escribir sobre ellos, los autores los relegaban siempre a un futuro lejano. Pero el estribillo de la serie de *Collier's* era que los humanos podían aventurarse en el espacio valiéndose tan sólo de la tecnología y los materiales ya existentes. Las ilustraciones mostraban cada una de las tuercas y tornillos de cada estadio de la evolución de un programa espacial completo y rematado, desde los primeros satélites no tripulados hasta la exploración de Marte. Von Braun y Bonestell llegaron incluso a ofrecer a los lectores páginas de cálculos y largas listas de materiales y costos.

Científicos y políticos comenzaron a reconocer que una exploración espacial fructífera no era tanto cuestión de tiempo o de tecnología cuanto de dinero e incentivación. Los investigadores que habían estado insistiendo al gobierno estadounidense para que respaldase un programa de satélites ya no parecían ser tan alocados visionarios. Mediados los años cincuenta, el gobierno había puesto en marcha el proyecto de un satélite artificial. En 1958, un año después del lanzamiento del *Sputnik 1*, los estadounidenses (tras un año de esfuerzos desesperados y repleto de fracasos) consiguieron elevar un satélite propio, el *Explorer I*.

En el decenio siguiente, Bonestell vio convertida en realidad la exploración tripulada del espacio. Observó malhumorado que las suaves colinas lunares fotografiadas por los astronautas de las misiones *Apolo* se parecían muy poco a los aserrados y románticos paisajes de sus pinturas. Tales inexactitudes apenas si rebajan en algo la importancia primaria del trabajo de Bonestell. Sus ilustraciones confieren inmediatez y verosimilitud a la sequedad de los datos astronómicos y los cálculos ingenieriles. Un sinfín de científicos, ingenieros y astronautas fueron inspirados por las imágenes de Bonestell en la elección de sus carreras.

Bonestell continuó trabajando hasta su fallecimiento en 1986, con un cuadro inacabado en su caballete de pintor. El asteroide número 3129 ha sido recientemente bautizado "Bonestell", distinción muy oportuna para un hombre cuyo arte contribuyó al nacimiento de la era espacial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPACE ART. Recopilación de Ron Miller. O'Quinn Studios, 1978.

WORLDS BEYOND: THE ART OF CHESLEY BONESTELL. Frederick C. Durant III y Ron Miller. Donning, 1983.

VISIONS OF SPACE: ARTISTS JOURNEY THROUGH THE COSMOS. David A. Hardy. Paper Tiger, 1989.

BLUEPRINT FOR SPACE; SCIENCE FICTION TO SCIENCE FACT. F. I. Ordway III y R. Liebermann. Smithsonian Institution Press, 1992.

Perforación direccional

Mediante nuevas técnicas de perforación se salvan obstáculos naturales o artificiales para extraer gas o petróleo, detectar contaminación en el subsuelo o instalar conducciones enterradas

George A. Cooper

Desde tiempo inmemorial, el hombre ha excavado pozos en busca de agua. Desde hace siglo y medio, hemos desarrollado técnicas para extraer otros importantes recursos que yacen en la corteza terrestre: gas natural y petróleo. La economía mundial consume al día más de 60 millones de barriles de crudo. Dentro del coste de producción puesto en juego, de una a dos terceras partes son exclusivamente imputables a gastos de perforación; a tenor de ciertas estimaciones, más de 11.000 millones de pesetas al día.

Las operaciones de perforación son costosas porque suelen efectuarse en regiones remotas con maquinaria de gran tamaño y complejidad, que requiere mucha pericia para su manejo. Por sencillez, la excavación de pozos acostumbra proceder en dirección vertical. Pero no por ser la más directa es siempre más práctica la trayectoria vertical; edificaciones, cursos de agua y cerros impiden a veces situar los equipos de perforación sobre la zona deseada. También puede tropezarse con fallas del subsuelo o formaciones inestables de rocas.

Al extenderse la prospección de gas y petróleo a lugares más problemáticos, los obstáculos apuntados van resultando más difíciles de evitar. El éxito técnico y económico de las tareas de perforación depende, por consiguiente, cada vez más de saber orientar el pozo directamente hacia el objetivo a explotar.

Para satisfacer tal necesidad se han desarrollado en los últimos diez años diversos métodos que permiten perforar horizontalmente pozos o galerías, siguiendo curvas o casi en cualquier dirección. Puede así orientarse la trayectoria de la perforación para extraer crudo de zonas que nunca serían accesibles a través de pozos verticales. La precisión de estas técnicas ha atraído también a especialistas ajenos al sector petrolero.

Existen hoy numerosas empresas dedicadas a captar energía geotérmica bajo la forma de vapor o agua caliente (procedente de actividad volcánica) por métodos de perforación direccional. También hay organizaciones ecologistas y empresas de tratamiento de residuos tóxicos que investigan y procuran limpiar los

1. EL TREN DE PERFORACION DIRECCIONAL excava un pozo que se curva a un ángulo cualquiera. Estas perforaciones llegan a bolsas de crudo y de gas cubiertas por fallas geológicas u obstrucciones artificiales que impedirían el uso de la tecnología tradicional. En la mayor parte de su recorrido, el tubo mide unos 12,5 centímetros de diámetro, pero los collares e instrumentos especiales del equipo normalmente tienen el doble de anchura. El pozo en sí, que puede extenderse miles de metros por el subsuelo, es sólo ligeramente más ancho.

contaminantes del subsuelo, y constructoras que tienden cables de servicio subterráneos entre zonas urbanas congestionadas.

Antes de existir esta tecnología, el único artefacto disponible para desviar la excavación de un pozo era una cuña de acero cónica llamada "empuñadura de látigo". Dicha cuña se fijaba, apuntando hacia arriba, en el interior del hoyo perforado. Después, al introducir de nuevo el equipo perforador en el hoyo, la cara inclinada de la cuña forzaba a la broca del taladro a desplazarse en sentido lateral, apartándose de su dirección original. Para sucesivas variaciones no había sino que añadir otros "mangos de látigo", de modo que en principio podían perforarse pozos en cualquier dirección. En la práctica, sin embargo, esta operación consumía tanto tiempo, que sólo se recurría a ella cuando había que contornear equipos atascados en el hoyo, en lo que solía llamarse "desviación".

Esta actitud cambió cuando las compañías petroleras se interesaron por los yacimientos submarinos. Para llegar al crudo enterrado bajo los fondos oceánicos, era preciso operar desde plataformas flotantes o, más frecuentemente, apoyadas en el lecho marino. Se trata de instalaciones que requieren una costosísima inversión. La plataforma Gullfaks C en el mar del Norte, por ejemplo, pesa 1,5 millones de toneladas, mide 260 metros de altura total y su coste de construcción ronda los 280.000 millones de pesetas. Su base cubre 1,6 hectáreas del fondo y el acero empleado para reforzarla bastaría para construir diez torres como la Eiffel. Y a veces se requieren varias estructuras como ésta para agotar un yacimiento. Pero si se emplearan técnicas de perforación direccional, una misma brigada podría trabajar desde la plataforma en la perforación de pozos en diferentes direcciones para alcanzar zonas distintas. Esta táctica ha satisfecho sobradamente sus expectativas. En enero de 1993, la compañía nacional de petróleos noruega estableció un récord mundial al perforar un pozo que horizontalmente se extendía 7290 metros desde su punto de iniciación, a 2743 metros de profundidad en el mar del Norte.

La perforación direccional atrajo a las compañías petroleras por una segunda razón: la orientación del pozo determina, en buena medida, la eficacia de la extracción. El petróleo bruto (el crudo) y el gas se encuentran en rocas porosas y permeables, situadas bajo lechos impermeables que cierran el embolsamiento por arriba. El crudo flota entre el gas y el agua formando una capa horizontal, usualmente de mayor anchura que grosor, de manera que el contacto de un pozo vertical con el crudo se reduce a muy pocos metros.

El objetivo técnico de la producción es extraer el máximo de petróleo posible sin sacar el agua que le subyace. La capa de gas situada encima puede recogerse con fines comerciales, o bien dejarse en su lugar con el fin de que ejerza presión sobre el crudo, de mayor valor, y le empuje hacia el pozo de extracción.

Pese a la pericia de los ingenieros, tras un período relativamente corto y a medida que se vacían los fluidos del embolsamiento, el nivel de agua sube y cae el nivel de gas. El pozo pierde entonces valor, pues empieza a dar agua y gas además de petróleo. Por el contrario, si el pozo atraviesa horizontalmente el yacimiento de crudo, extraerá mucho menos gas y agua que si fuera vertical, ya que la perforación recorre cientos o tal vez miles de metros de la bolsa petrolífera.

Los pozos horizontales ofrecen también otra posibilidad de aumentar las extracciones. A menudo, el crudo rellena las fracturas que atraviesan el embolsamiento. Estas suelen discurrir en planos paralelos (casi siempre verticales), debido a que la corteza normalmente se rompe en dirección perpendicular a la de mínima tensión geológica. Utilizando con destreza la perforación direccional, pueden excavarse pozos horizontales que vayan cruzando las principales fracturas del campo petrolífero para extraer el crudo que encierran. Lo cierto es que el empleo de la perforación direccional ha elevado hasta diez veces la producción de los pozos.

GEORGE A. COOPER dirige el programa de ingeniería del petróleo en la Universidad de California en Berkeley. Absorben su atención los métodos que permiten aumentar el rendimiento de la perforación y reducir su impacto ambiental en aplicaciones petroleras, geotérmicas y de ingeniería civil. Doctorado por la Universidad de Cambridge, trabajó durante veinte años en técnicas de sondeo al servicio de la administración y la industria privada.

No resulta nada fácil adaptar los métodos de perforación tradicionales para que logren a su vez semejantes hazañas. En estas operaciones, la broca taladradora va unida a una cadena de tubos empalmados que los operarios giran desde la superficie. La broca, presionada por el peso de los tubos que tiene encima, va rompiendo la roca del fondo del hoyo. La fuerza motriz primaria proviene de treinta o más metros de secciones de tubo muy pesadas, denominadas collares de perforación, colocadas inmediatamente sobre la broca. El resto de la cadena se compone de tubos más delgados, suspendidos de la grúa o torre de perforación. Por el tubo se inyecta lodo de perforación —generalmente arcilla y otros aditivos con agua—, que luego sale por las toberas situadas frente a la broca y regresa a la superficie por el espacio de holgura entre el tubo y la pared del pozo perforado, arrastrando consigo los fragmentos de roca cortados.

En su mayor parte, la cadena de perforación está formada por tubos de acero, que miden doce o trece centímetros de diámetro y hasta tres mil metros de longitud. Quizá parezcan muy rígidos unos tubos de estas dimensiones, pero su flexibilidad vie-

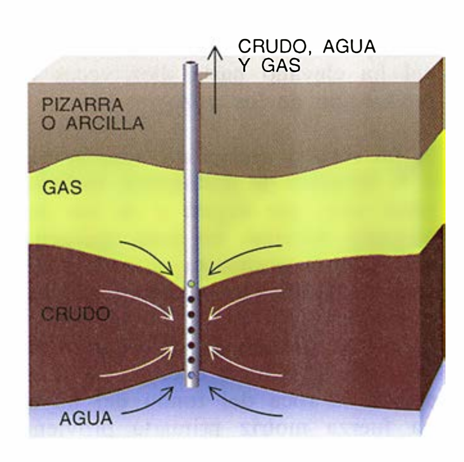


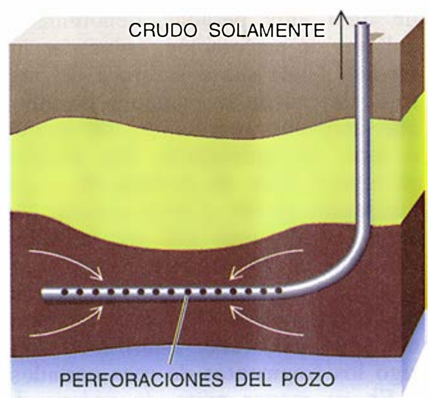
ne a ser la de una aguja hipodérmica de un milímetro de diámetro y más de veinte metros de largo.

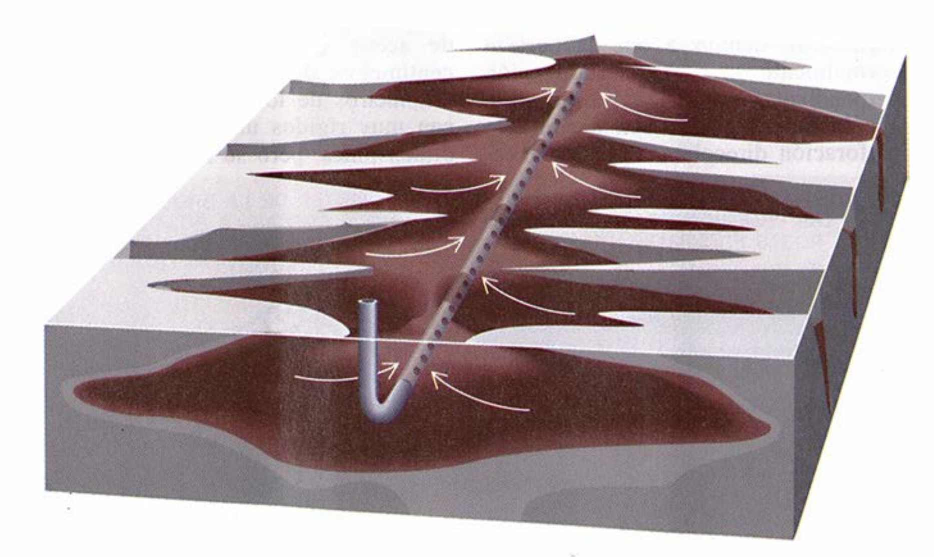
Para perforar siguiendo una curva predeterminada, se ha de poder curvar esta tubería en la medida y la dirección necesarias. La perforación direccional logra este control insertando en el tubo, junto a la broca, una sección de collar curva, llamada "codo". Por lo general, este codo sólo desvía unos pocos grados la trayectoria, suficientes para perforar pozos con radios de curvatura desde menos de cien metros hasta varios kilómetros.

Ahora bien, puesto que el codo desvía lateralmente la broca, ya no puede hacerse girar el conjunto entero desde la superficie como en la perforación vertical. Si así se hiciera, la broca iría trazando una espiral en la roca y finalmente se obtendría una trayectoria vertical. Para salvar el problema, los técnicos han desarrollado unos motores que se colocan dentro del pozo y hacen girar directamente la broca una vez que el codo está en su sitio. Ciertos mecanismos maniobrados desde la superficie giran el tubo para cambiar la orientación del codo insertado, de suerte que la broca taladradora apunte arriba, abajo, a la izquierda o a la derecha, según se desee.

El éxito de estos diseños depende de que se reduzca al mínimo el rozamiento con la parte inferior del pozo. Si éste sigue una trayectoria casi horizontal, los collares de perforación se apoyarán sobre un costado del pozo. Habrá que utilizar un lodo de perforación muy untuoso para que no se queden atascados materiales ni fragmentos de roca. Cuando el pozo adquiera plena horizontalidad, los collares de perforación no podrán situarse cerca de la broca, porque no harían sino arrastrarse sobre la pared inferior del pozo en lugar de presionar la broca para que avance. Por eso, en tales casos, los collares se colocan en el tramo vertical superior del pozo, y desde esa posición empujan las siguientes secciones de tubo, relativamente ligeras, a lo largo del tramo llano de la perforación. Debe evitarse que ese tubo más fino se pandee o atasque en las paredes del pozo excavado; con ese fin se han creado tubos de perforación ligeros y rígidos, a un tiempo.







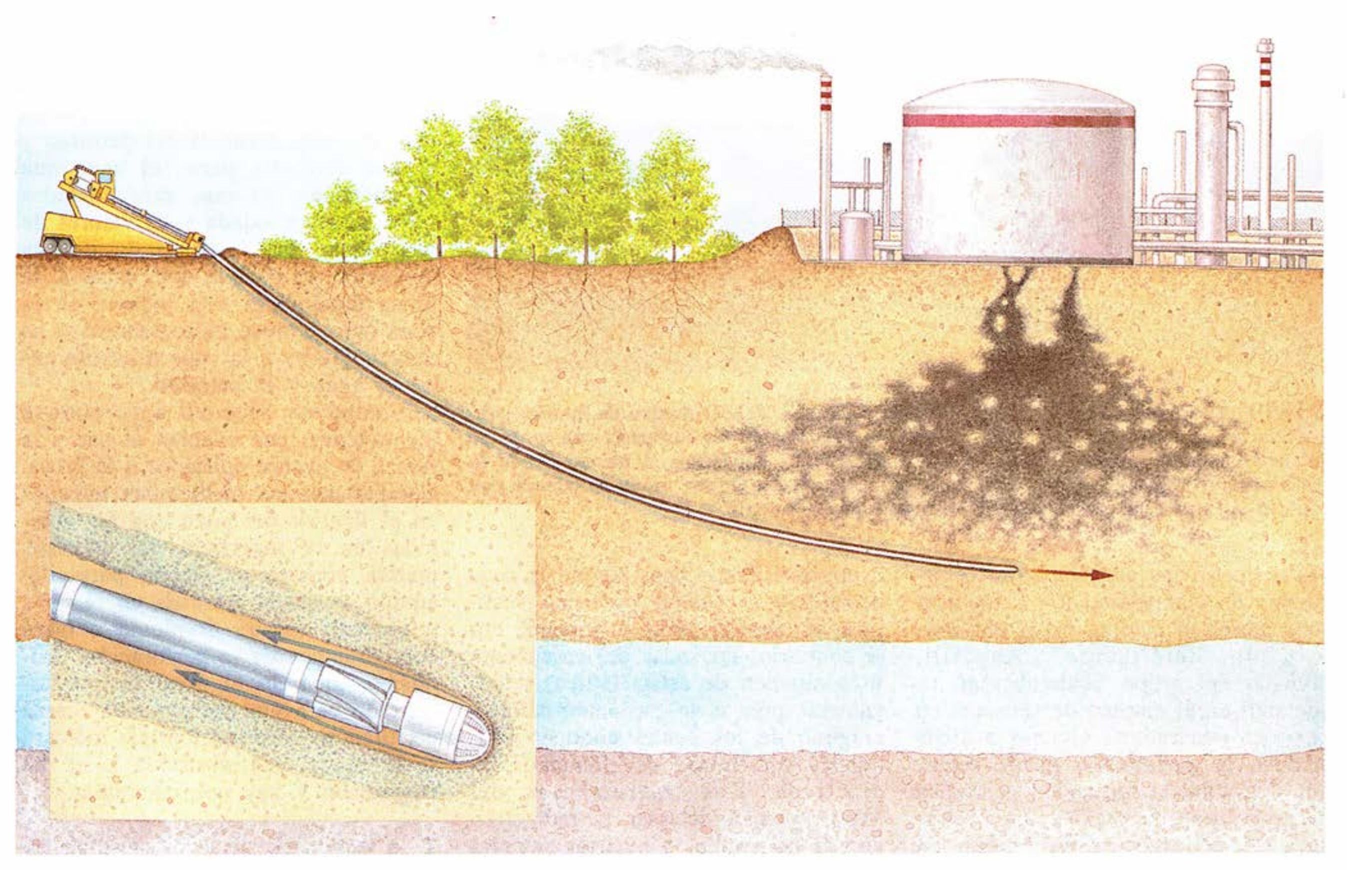
2. LA PRODUCCION DE CRUDO de un pozo vertical (*arriba*) es mucho menor que la de un pozo horizontal (*centro*). Estas galerías horizontales presentan muy poca conicidad, efecto que se produce al disminuir los fluidos del yacimiento de tal modo que el pozo comienza a dar agua y gas. El pozo vertical atraviesa una sección relativamente estrecha de la capa de crudo, que al adelgazarse pronto llega a la conicidad. El pozo horizontal puede llegar al crudo en cientos y hasta en miles de metros, y por ello la conicidad no impide la extracción hasta que no se ha recogido casi todo él. Además, esas galerías horizontales pueden cruzar las fallas de la roca y extraer el crudo que contengan (*abajo*).

También han resuelto los diseñadores otros problemas posibles. El flujo del lodo inyectado a través del tubo acciona el motor interior utilizado en el equipo de perforación direccional. En un principio se probaron las turbinas, pero el mejor rendimiento de estos motores se da a velocidades de varios cientos de revoluciones por minuto, demasiado elevadas para las brocas taladradoras tradicionales. Además, como el lodo sigue circulando aunque el motor no funcione, a veces no podía saberse si la turbina giraba, y en todo caso si su velocidad era la correcta.

De ahí que la industria haya recurrido al motor de desplazamiento positivo. En estos motores, el lodo fluye en cavidades situadas entre un rotor de acero, en forma de espiral acanalada, y un estator revestido de goma. Estas cavidades se abren y se cierran al girar el motor, y existe una correlación directa entre el flujo de lodo y la velocidad del motor. Es posible fabricar motores que tengan un margen muy amplio de velocidades y de pares merced a la variación del número de lóbulos radiantes de la espiral y el control del ángulo de dichos lóbulos. La primera vez que se instalaron motores de desplazamiento positivo en cadenas de perforación, el rotor y el flujo de lodo rozaron el estator de goma y lo desgastaron rápidamente. Pero ese inconveniente ya está solucionado.

Además de desarrollar motores interiores especializados, los técnicos han diseñado equipos nuevos para excavar pozos que formen ángulos muy acusados. En ciertas aplicaciones, la curvatura del pozo requiere tal inclinación, que la cadena de tubos de perforación carece de la elasticidad suficiente para adaptarse a ella.

Una solución consiste en utilizar un tubo de guía exterior, el cual se ha ranurado para que pueda flexionar desde la línea recta a una curva de 10 a 20 metros de radio (dependiendo de las dimensiones del pozo). Dentro del tubo de guía se instala el



3. LAS OPERACIONES DE LIMPIEZA emplean ahora métodos de perforación direccional para examinar y tratar los contaminantes filtrados al suelo desde instalaciones industriales. Entre otras muchas ventajas, los operarios no necesitan trabajar directamente sobre el lugar contaminado, ni siquiera en sus cercanías, lo que comporta menos riesgo de contaminarse. Además, si se utiliza como lodo de perforación gas a baja temperatura, los contaminantes se congelan y pueden tomarse muestras con mayor precisión.

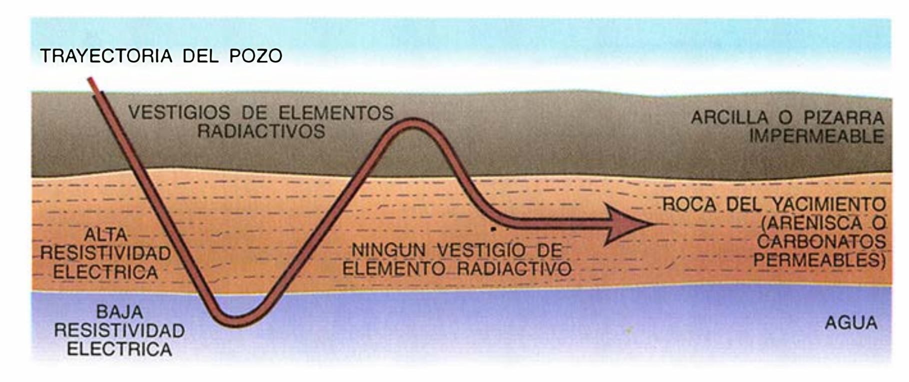
tubo perforador, compuesto de segmentos articulados. Estos eslabones, a modo de vértebras, permiten que el tubo se curve sin dejar de entregar un par motor a la broca situada en su extremo. Un tercer tubo flexible, concéntrico con los otros dos e interior a ellos, conduce el lodo de perforación hacia la broca. El tubo exterior, de acero, se curva de manera natural, y aunque los tres tubos deben estar completamente rectos para penetrar en el pozo, una vez que comienza la perforación, la elasticidad natural de la guía dirige la broca según la necesaria trayectoria curva. De este modo, en pocos metros, el pozo se habrá hecho horizontal.

En ciertos yacimientos, se consigue una eficaz extracción por medio de perforaciones que se extienden horizontalmente, en estrella, desde el fondo de un pozo vertical. Para ello se introduce en el pozo una guía especialmente diseñada, conformada de tal manera que haga doblarse el tubo que lleva en su interior para seguir una curva y luego lo enderece horizontalmente en menos de un metro. Se apoya, pues, dicha guía en el fondo del pozo principal y se hace pasar por su interior un tubo más delgado de acero. Por una tobera en el extremo delantero de este tubo se lanza un chorro de agua a alta presión que erosiona la roca, dejando así que el tubo avance. Cuando éste se ha alejado de la guía un trecho suficiente, los operadores utilizan productos químicos para separarlo del resto de la cadena perforadora. Se procede luego a extraer la guía o a girarla en una nueva dirección para acometer una o más perforaciones adicionales.

Es esencial el poder orientar con precisión la perforación. Como mínimo, el técnico que la controla necesita conocer la inclinación y la marcación magnética (acimut) del pozo excavado, así como el ángulo de la cara del taladro. Dicho ángulo indica hacia dónde apunta la broca, y por consiguiente la dirección en que va a proseguir inmediatamente la perforación. Los ingenieros registran estos datos sobre el terreno mediante gráficos que describen las rotaciones del tubo de perforación en la superficie; dejando caer por el tubo un pequeño instrumental —brújula y péndulo, por ejemplo— colgado de un cable puede conocerse la orientación del tren perforador en cualquier momento.

Por desgracia, para añadir secciones suplementarias de tubo de perforación a medida que la perforación profundiza es preciso desconectar el cable. En consecuencia, tiene que estar desmontado el cable y el juego instrumental mientras duran las operaciones de perforación normales. Cada vez que se necesite medir hay que detener la perforación y hacer descender por el tubo el paquete de instrumentos, con una pérdida de tiempo considerable. Buscando la eficacia, se han desarrollado varios sistemas en los cuales se incorporan unos instrumentos de medición autoalimentados que funcionan al mismo tiempo que la perforación. Estos dispositivos, que miden mientras se perfora (*measurement while drilling*, MWD), transmiten información a la superficie al detener y liberar el flujo de lodo de perforación a medida que va pasando por el instrumento. Los cambios en la velocidad de flujo causan fluctuaciones en la presión del lodo que pueden ser detectadas en la superficie y decodificadas para averiguar en qué dirección se está perforando.

Los instrumentos MWD más refinados incorporan circuitos electrónicos para medir las propiedades físi-



4. PODEMOS MANTENER LA TRAYECTORIA DEL POZO dentro de la roca productiva de un embolsamiento si la cadena de perforación va equipada con sensores de orientación geológica. Tales sensores indican a la superficie si ha cambiado la resistividad o radiactividad de las rocas que atraviesan. De ese modo se conoce con rapidez si la galería extractora se ha salido del yacimiento.

cas de las rocas que encierran o circundan un embolsamiento. Estos sensores abren el camino hacia una perforación "inteligente". Anadrill, división del grupo Schlumberger, se adelantó en el empleo de sensores en la broca taladradora. Gracias a dicha técnica, la perforación puede seguir una determinada formación geológica hacia la zona de explotación (donde yace el petróleo aprovechable) sin más que observar la configuración rocosa que la broca tiene ante sí.

Sirva de ejemplo la situación siguiente. Los embolsamientos de crudo están formados por roca arenisca o carbonatos permeables que yacen bajo capas impermeables de arcillas o pizarras. Estas capas cierran la zona petrolífera y suelen contener vestigios de uranio, torio y potasio. Por el contrario, las rocas del yacimiento se componen de arena (sílice) relativamente pura o de carbonato cálcico, ninguno de los cuales contiene cantidades apreciables de elementos radiactivos. Los instrumentos del MWD pueden detectar la radiactividad de las arcillas y pizarras situadas por encima del yacimiento e informar de ello al personal de la superficie. Estos podrán entonces dirigir la perforación de manera que permanezca siempre dentro del lecho rocoso petrolífero y evite las improductivas pizarras.

CAMPO PETROLIFERO

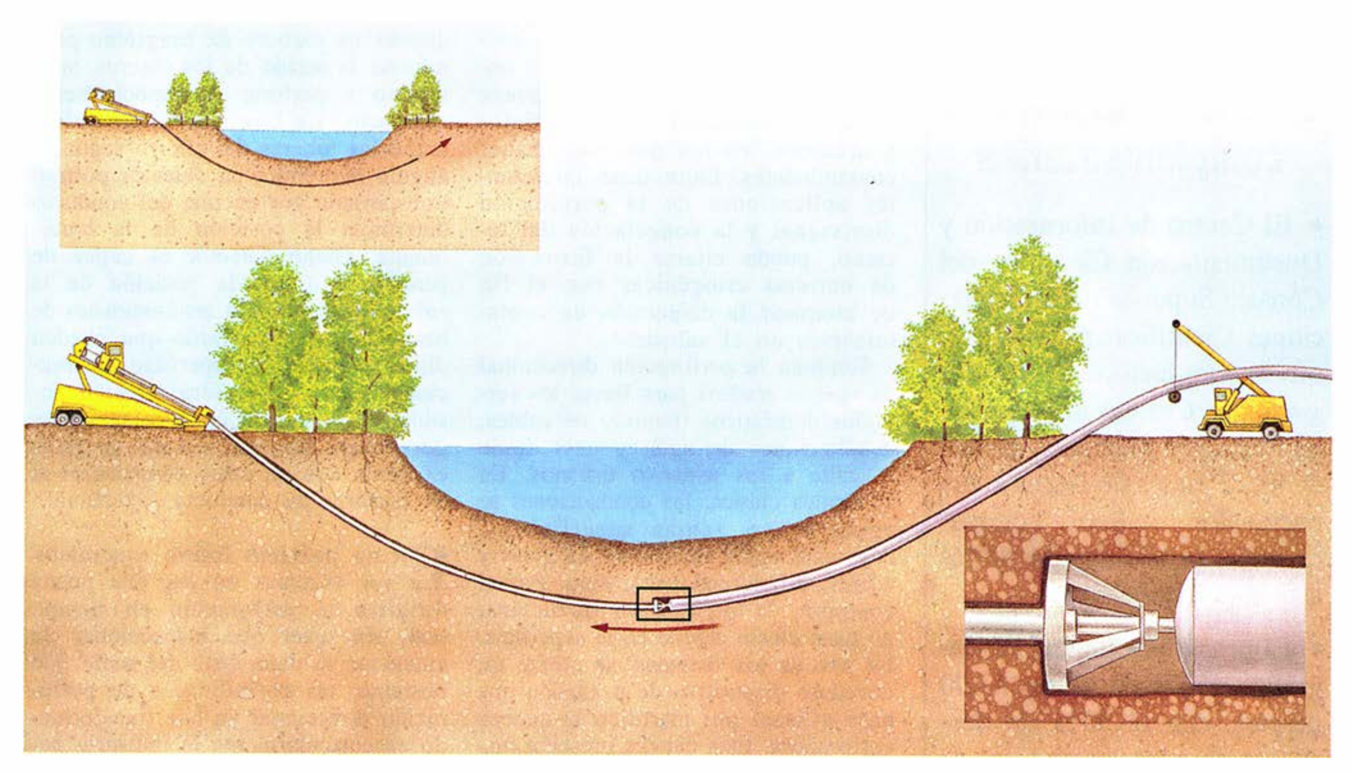
5. LA EXPLOTACION DE LARGO ALCANCE utiliza perforación direccional para excavar pozos en campos petrolíferos próximos a la costa. Un pozo dirigido cubre una zona de crudo mucho más extensa (*verde*) que lo haría un pozo vertical (*azul*), por lo cual se necesitarán menos plataformas para explotar el embolsamiento. Estas costosas plataformas en el mar podrán evitarse por completo si se consigue perforar galerías de longitud suficiente para llegar al yacimiento desde bases en tierra firme (*rojo*).

Con otro tipo de sondas se mide la resistividad eléctrica de la roca que rodea el pozo. Estos minerales tienen por sí mismos una resistividad muy elevada, como la del petróleo y el gas. Por otra parte, el agua que se encuentra en esas profundidades suele ser algo salada y da valores de resistividad bajos. Partiendo de esa distinción, es posible determinar si la broca taladradora está todavía en la zona que contiene hidrocarburos o ha descendido ya a la capa limítrofe entre el agua y el petróleo.

Finalmente, pueden incorporarse instrumentos que evalúen el par y la fuerza de avance aplicados a la broca. Comparando las mediciones tomadas en el interior del pozo con las obtenidas en la superficie, los técnicos podrán conocer si alguna parte del equipo se queda atascada en el pozo y prevenir así un desplome u otros contratiempos de la perforación. Asimismo, medirán el nivel de par registrado para una determinada fuerza perforadora, información que indicará si la broca está obstruida o se ha desgastado y hay que cambiarla.

La tecnología de la perforación direccional ha encontrado múltiples aplicaciones fuera del sector del petróleo. Los proveedores de servicios de agua, gas, electricidad y comunicaciones están adoptando rápidamente este sistema para hacer pasar cables o tendidos de tubos bajo carreteras, edificios y ríos. La perforación direccional es la solución ideal para tales proyectos, puesto que, a diferencia de los métodos tradicionales, no requiere acceder a la superficie situada sobre el pozo excavado. En los años setenta, se perforaron en Estados Unidos 50 cruces de ríos que totalizaban unos 20.000 metros; en cambio, solamente en 1988, diversas compañías completaron 200 instalaciones de este tipo con un total de 60.000 metros. La Cherrington Corporation logró un récord mundial en 1993 al instalar 1266 metros de un gasoducto de 122 centímetros de diámetro bajo el río Sacramento en California. En Europa, 610 metros de gasoducto de 1,2 metros discurren bajo el canal de Noord Holland en los Países Bajos, y en Quebec (Canadá) aproximadamente 1800 metros de conducción de 20,3 centímetros corren bajo el lecho del río San Lorenzo.

En cruces de este tipo, la perforación debe bajar en pendiente muy suave, de tal manera que el tubo horizontal que pase bajo el río sufra la mínima tensión por curvatura posible. Por consiguiente, se utilizan



6. LOS PROYECTOS DE CRUCE DE RIOS con tubería pesada se dividen en dos etapas. Primero se taladra un estrecho conducto de un lado a otro del río (*encuadre superior*). Cuando el delgado taladro llega al extremo distante, se le une a una cabeza escariadora que está conectada a la tubería ancha (*abajo*). Se tira después de todo el conjunto a través del conducto en dirección opuesta, hacia donde se inició la perforación. Con este procedimiento en dos etapas se reduce el riesgo de desplome del conducto.

equipos de perforación que profundizan sólo lo necesario para salvar el río, en vez de seguir un trayecto más largo y hondo, de perfil en horquilla. En consecuencia, la galería excavada no tiene ningún tramo vertical. El tren de perforación penetra en el terreno movido por potentes crics, sin ayuda de collares como en la perforación vertical clásica. Dicho tren va guiado por un sistema sensor autocontenido, próximo a la cabeza de perforación. Si la galería es somera y la superficie por encima de su trayectoria está despejada, puede utilizarse un cable eléctrico tendido sobre el suelo para transmitir señales a las unidades sensoras subterráneas ubicadas cerca de la broca. De ese modo, puede marcarse con gran precisión la dirección del taladro; es frecuente que el conducto salga a sólo veinte o treinta centímetros de su objetivo tras haber recorrido cien o más metros bajo el suelo.

Generalmente, el terreno bajo un lecho fluvial es blando. Por tanto, en las operaciones de cruce de ríos se han de tomar especiales precauciones para evitar el desplome de la galería. Una de ellas consiste en fraccionar en etapas la perforación. Primero se excava bajo el río un conducto piloto de pocos centímetros, que cubra toda la longitud propuesta. Sobre el tubo que sigue al equipo perforador se desliza un tubo "de guarda", del mismo diámetro que el conducto a excavar. La misión de ese tubo es proteger la blanda pared del conducto de la abrasión producida por el tubo taladrador al girar y la erosión que causa el retorno del flujo de lodo de perforación. Una vez que el equipo de perforación ha alcanzado la superficie en el extremo lejano del cruce, los operarios desmontan la broca e instalan en su lugar una cabeza escariadora. Esta cabeza va unida por una rótula giratoria a la tubería que finalmente ha de instalarse; de este modo, la cabeza puede girar sin que tenga que hacerlo también la tubería. La maquinaria tira luego del conjunto de tubo taladrador, cabeza escariadora y tubería hacia atrás, a través del conducto y en dirección opuesta a aquella en que se inició el cruce, con lo cual queda completado el paso.

La perforación direccional ha demostrado ser útil en la lucha contra la contaminación. Los derrames de los depósitos de almacenamiento y otras instalaciones industriales a menudo contaminan el terreno subyacente. Puede resultar difícil, si no imposible, llegar a estos lugares por arriba. La perforación direccional ofrece un medio para examinar y limpiar tales zonas. Además, como la maquinaria y los operarios no necesitan situarse directamente sobre el lugar afectado, ni siquiera en su proximidad, corren menos riesgos de contaminarse. En el norteamericano Centro del Río Savannah del Departamento de Energía, por ejemplo, una brigada de limpieza utilizó un par de perforaciones horizontales para eliminar contaminantes orgánicos volátiles procedentes de las filtraciones de una galería de alcantarillado. Para ello inyectaron aire en el suelo por uno de los conductos, y por el otro conducto extrajeron vapor. El equipo informó que este procedimiento había ahorrado unos 17.000 millones de pesetas frente a una solución alternativa que implicaba la excavación de una serie de pozos verticales.

En mi laboratorio de la Universidad de California en Berkeley, estamos desarrollando otra sugestiva técnica. Consiste en utilizar aire o nitrógeno a muy baja temperatura en lugar del lodo de perforación. Este enfoque ofrece varias ventajas. En primer lugar, en ciertas condiciones incluso el agua puede alterar la composición de los contaminantes del subsuelo o arrastrarlos a regiones sin contaminar. Por otro lado, el gas es mucho menos penetrante. Además, por estar el gas a baja temperatura, los contaminantes se quedan helados en su sitio y pueden tomarse muestras con mayor precisión. Por si fuera

poco, el anillo de terreno helado sostiene el conducto excavado y le impide desplomarse. Este efecto adquiere particular intensidad en suelos flojos y arenosos, en los que suele haber contaminantes. Entre otras interesantes aplicaciones de la perforación direccional y la congelación del terreno, puede citarse la formación de barreras criogénicas con el fin de bloquear la dispersión de contaminantes en el subsuelo.

También la perforación direccional da nuevos medios para llevar los servicios domésticos (tendido de cables, conducciones de agua y gas) desde la calle a los usuarios urbanos. En la técnica clásica, las conducciones se entierran en zanjas superficiales, cuya excavación interrumpe calzadas y aceras, dificultando el tráfico. Por el contrario, la perforación direccional no tiene efecto alguno en la superficie. En uno de los sistemas, se utiliza un novedoso dispositivo de percusión que hace avanzar por martilleo la cabeza perforadora. Esta cabeza presenta una cara inclinada que excava el hoyo con cierto sesgo. Unas aletas en espiral situadas detrás de la cabeza hacen girar el cuerpo del martillo a medida que avanza a través del terreno.

La cabeza perforadora puede dejarse libre para que gire por su cuenta, o bien fijarse al cuerpo del martillo para girar solidariamente con él. En el primer caso, la cabeza mantiene una orientación constante y excava un conducto curvado; en el segundo caso, el conducto excavado es recto. Un operario que camine, provisto de un sensor, sobre el suelo bajo el cual discurre el conducto podrá detectar la posición de la cabeza perforadora y controlar su conexión al cuerpo del martillo. Es posible dirigir así, palmo a palmo, la trayectoria de la perforación.

En otro dispositivo elaborado para la construcción de conducciones de servicios se utilizan toberas que disparan chorros de líquido a presiones de hasta 250 bar (264 kilogramos por centímetro cuadrado), ya sean de agua dulce o de lodo de perforación. El lodo reviste y sella la pared del conducto, reduciendo el peligro de desplome. Los chorros de agua y de lodo lanzados a esa presión penetran a través de la mayoría de los suelos, pero dejan intactos el hormigón, los tubos y los cables. En consecuencia, con este método de perforación a chorro se corren muy pocos riesgos de dañar otras galerías de servicio del subsuelo, sobre todo cuando hay profusión de conducciones.

La cabeza puede equiparse con dientes de carburo de tungsteno para reforzar la acción de los chorros, si el terreno a perforar es especialmente compacto. La broca se dirige orientando las toberas del chorro según el ángulo requerido; un detector portátil transportado por encima del conducto determina la posición de la herramienta. Dicho detector es capaz de percibir y dirigir la posición de la cabeza perforadora a profundidades de hasta diez metros. Dado que pueden dirigirse desde la superficie perforaciones tan hondas, será también posible tender nuevas conducciones muy por debajo de una red de servicios existente con un coste comparable al de perforar un conducto superficial.

En un próximo futuro esperamos ver sistemas en los que pueda dirigirse la perforación en tiempo real, sin tener que inspeccionar de antemano la naturaleza del suelo. No obstante, las posibilidades de perforación direccional ya han transformado espectacularmente la industria petrolífera. En California, por ejemplo, los grandes patrones de la industria, los gobiernos locales y los ecologistas apoyan conjuntamente una reciente propuesta de explotación de largo alcance que estaría basada en la perforación direccional. Se proyecta demoler una plataforma instalada frente a la costa de Santa Bárbara y acceder al campo petrolífero que ésta explota, el campo de South Elwood, desde torres de extracción situadas en tierra. Las compañías petroleras podrían ahorrarse dinero con la ejecución de este proyecto, ya que sus pozos serían más productivos, y además no necesitarían plataformas, buques petroleros o de servicio. Sus trabajos aportarían mayores ingresos a la comunidad local. Por añadidura, la explotación de largo alcance encierra menos riesgos de vertidos en aguas costeras, genera menos contaminación del aire y no causa daño alguno en las zonas pesqueras lucrativas y las reservas marinas.

No solamente son más eficaces y económicas las técnicas de perforación direccional para una serie de aplicaciones, sino que también están demostrando una mayor seguridad para el entorno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIRECTIONAL DRILLING. Society of Petroleum Engineers Reprint Series n.º 30, 1990.

HORIZONTAL DRILLING. Society of Petroleum Engineers Reprint Series n.º 33, 1991.

THE PRIZE: THE EPIC QUEST FOR OIL, MONEY AND POWER. Daniel Yergin. Simon & Schuster, 1993.

Desarrollo de la corteza cerebral

Las uniones de hendidura conectan entre sí a grupos de neuronas en la corteza neonatal. Tales grupos forman una arquitectura modular de dominios columnares

Rafael Yuste

En la investigación científica contemporánea, pocas fronteras son más excitantes que la de entender cómo funciona el cerebro. Para comprender la magnitud del problema, conviene saber que el cerebro adulto del hombre posee más de cien mil millones de neuronas, o células nerviosas; conectadas entre sí de una manera muy compleja, realizan rutinariamente y con mínimo gasto energético computaciones mucho más elaboradas que los ordenadores de mayor potencia.

A falta de una teoría general sobre el funcionamiento del cerebro, es muy posible que su poder computacional resida en el refinado patrón de conexiones entre neuronas, cuyas reglas generales fueron ya descritas por Santiago Ramón y Cajal, hace un siglo. Los neurobiólogos actuales se encuentran en una situación similar a la de un científico extraterrestre que intentase comprender cómo funciona la sociedad humana consultando el mapa de la red telefónica, pero sin entender en qué se ocupa cada uno de los usuarios de la red ni qué idioma habla.

Al margen de ese problema funcional, tenemos una cuestión fascinante: cómo se forma, durante el desarrollo del animal, esa red de conexiones cerebrales. Se trata, en efecto, de un problema logístico de enorme complejidad y realizado, no obstante, con suma precisión en breve intervalo de tiempo.

Existen dos explicaciones alternativas, aunque no excluyentes entre sí, sobre la forma en que las neuronas alcanzan sus "dianas" y operan sus conexiones precisas durante las fases de desarrollo: la hipótesis de la afinidad química o reconocimiento molecular y la hipótesis de la actividad neuronal.

1. SISTEMA NERVIOSO CENTRAL HUMANO, del que se ilustran la corteza cerebral (*rojo*), el cerebelo (*azul*), la protuberancia anular (*verde*) y el bulbo raquídeo (*amarillo*). La corteza cerebral, la región de evolución más reciente, en el hombre ocupa la mayor parte del encéfalo; se trata de una capa de unos 2 milímetros de ancho y de una superficie de unos 2 metros cuadrados. En la cavidad craneana, la corteza se encuentra doblada formando giros y surcos cerebrales.

Debemos la primera al propio Cajal. En su versión moderna, modificada por Roger W. Sperry (1913-1994) y su escuela, la hipótesis del reconocimiento molecular sugiere que cada neurona tiene especificada una identidad molecular que le permite ser reconocida por otras neuronas que entran en conexión con ella. De esta manera, en una simplificación didáctica de la teoría, el problema que entraña la organización de miles de millones de proyecciones a la vez lo ha resuelto la evolución al especificar un "listín de teléfonos" en el que cada neurona porta un "número" molecular que difiere, en su estructura química, del de las otras; además del número, cada neurona tiene asignada una "dirección" espacial en el interior del cerebro.

Esta hipótesis se ha empleado con éxito en la explicación del desarrollo de la proyección retino-tectal de los anfibios, la construcción del sistema nervioso ventral del saltamontes y *Drosophila* y el desarrollo de las proyecciones comisurales en la médula espinal.

La hipótesis de la actividad neuronal fue esbozada, entre otros, por Paul Weiss, maestro de Sperry. Weiss destacó la importancia de la actividad neuronal en el desarrollo. En los últimos treinta años, esta segunda teoría ha logrado dar cuenta del desarrollo de la proyección tálamo-cortical de la corteza visual de mamíferos, gracias al trabajo pionero de Torsten Wiesel y David Hubel, de la Facultad de Medicina de Harvard, y continuado actualmente por los miembros de su escuela.

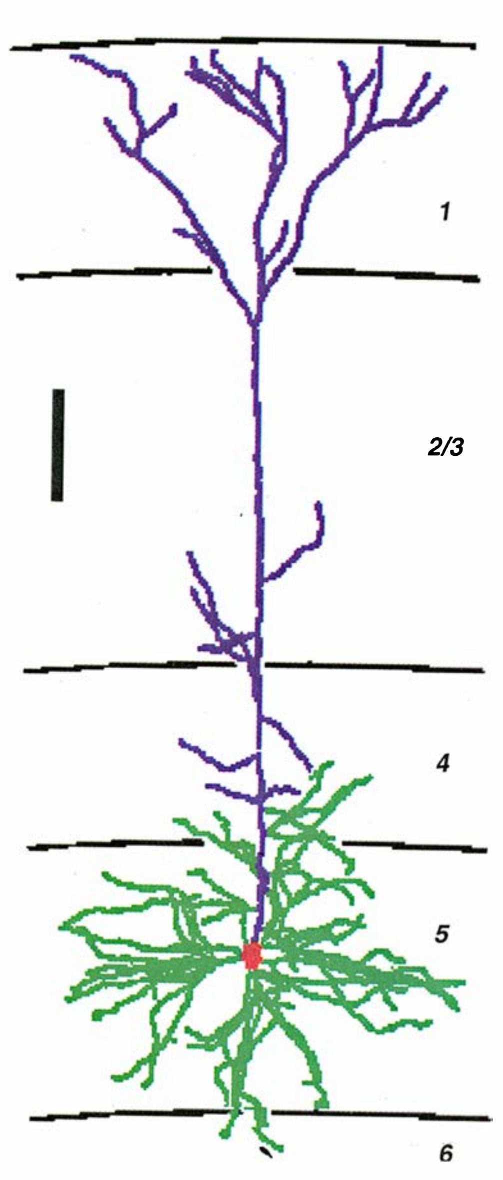
La corteza constituye la parte del cerebro más reciente, desde el punto de vista filogenético. Surgió hace unos 200 millones de años, durante el Mioceno. Se expande en los mamíferos, particularmente entre los primates, hasta ocupar la mayor parte del cerebro en el hombre.

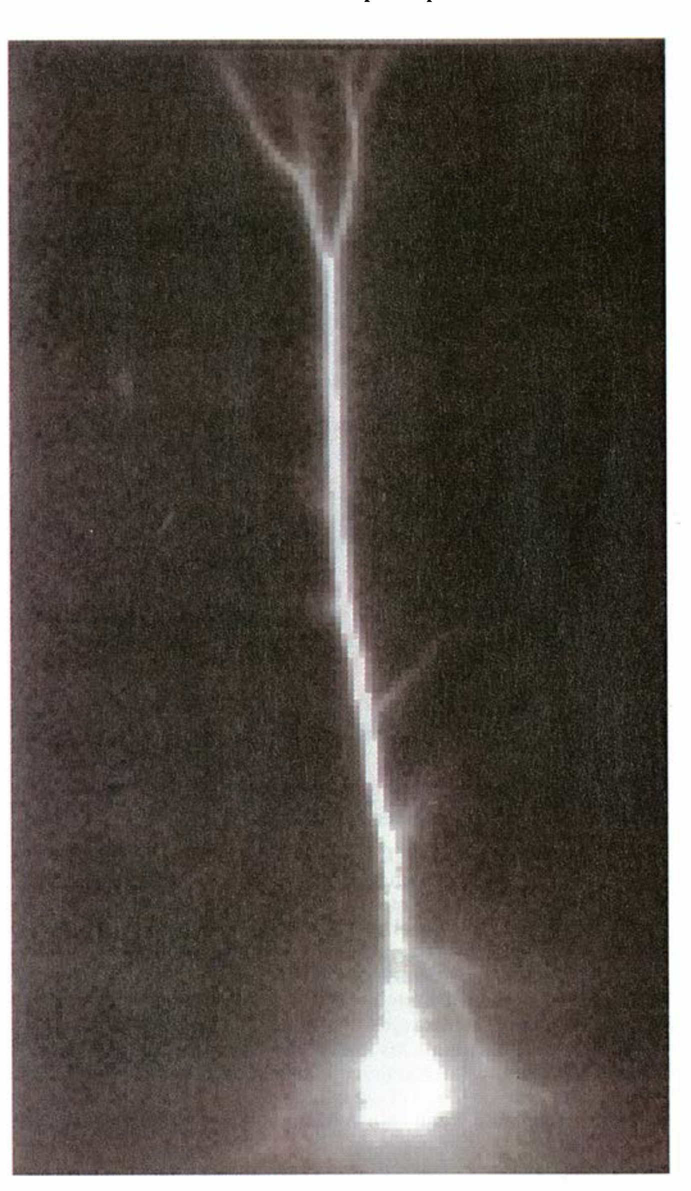
Por el estudio de lesiones en pacientes neurológicos y animales de laboratorio, sabemos hoy que la corteza es necesaria para las siguientes actividades, entre otras: percepción sensorial, actividades motoras voluntarias, almacenamiento de distintos tipos de memorias, actividad consciente, imaginación e ideación de situaciones futuras. El interés que revisten estas funciones para la vida humana ha convertido a la corteza en una de los objetivos primordiales de la investigación neurobiológica.

La corteza consta de seis capas horizontales. Está formada básicamente por neuronas piramidales, cuyas conexiones fueron descritas por Cajal y, sobre todo, por su discípulo Rafael Lorente de Nó, quien propuso que la corteza estaba constituida por múltiples repeticiones de un circuito modular de columnas verticales de neuronas que se extienden desde la substancia blanca hacia la superficie o substancia gris. La demostración definitiva de la teoría columnar se debió a Vernon B. Mountcastle, de la Universidad Johns Hopkins, y, sobre todo, a David Hubel y Torsten Wiesel. Los dos grupos se sirvieron de métodos electrofisiológicos y anatómicos para demostrar que la corteza visual y la somatosensorial están subdivididas en columnas de neuronas con similares funciones.

RAFAEL YUSTE estudió medicina en la Universidad Autónoma de Madrid, trabajando en los laboratorios de A. Sols, A. Ferrus, C. Cuello y S. Brenner. Realizó estudios de doctorado en el Laboratorio de T. Wiesel, en la Universidad de Rockefeller de Nueva York. Actualmente es investigador asociado en el Departamento de Biología Computacional en los Laboratorios Bell de AT&T en Murray Hill.

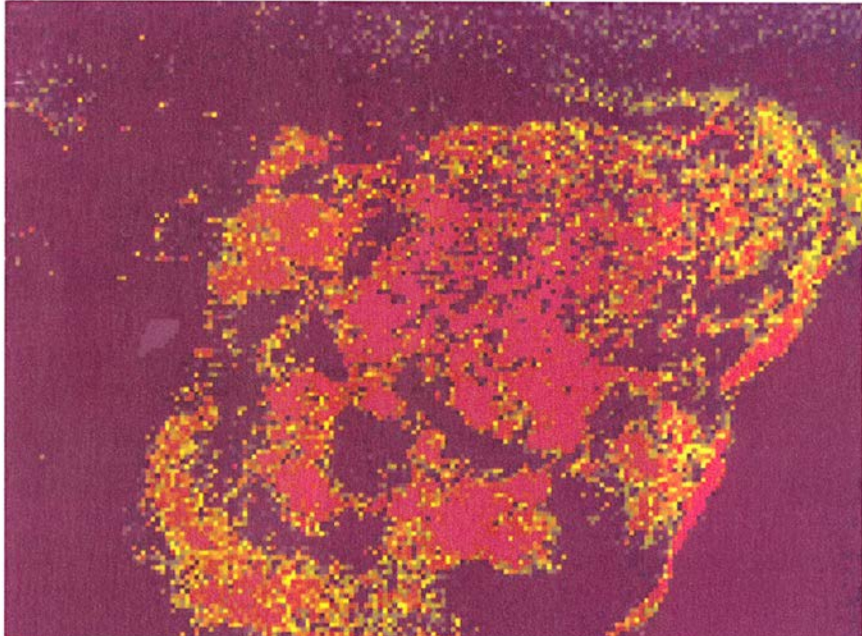
El problema de cómo se organiza en el desarrollo la arquitectura columnar de la corteza fue abordado también por Hubel y Wiesel. Su contribución principal fue el descubrir





2. NEURONA PIRAMIDAL, componente mayoritario de la corteza. En el esquema de la izquierda se ofrece una neurona piramidal típica de la capa 5 de la corteza somatosensorial de la rata. Los bordes de las seis capas corticales han sido marcados en negro. Estas neuronas se distinguen por tener un soma o cuerpo celular (*rojo*) de forma piramidal y una dendrita apical (*azul*) que sube en muchos casos hasta la capa 1. Además, las neuronas piramidales presentan un sistema dendrítico basal (*verde*) alrededor del soma. Las dendritas reciben impulsos nerviosos que son transmitidos al soma y al axón o cilindroeje (no dibujado), que contacta con otras neuronas. La escala mide 100 micrometros. La fotografía de la derecha corresponde a una neurona piramidal de la capa 5 de un corte de corteza de rata, inyectada intracelularmente con el colorante fura-2. Se aprecian claramente el soma piramidal y la dendrita apical que se extiende hasta la capa 1.





3. ORGANIZACION DE LA CORTEZA en mapas funcionales columnares. En el panel superior se ofrece una vista de la corteza visual primaria de un mono macaco tomada durante un experimento de registro óptico. Se aprecian los vasos sanguíneos en la superficie cortical. En el panel inferior aparece una imagen procesada del registro óptico de esa misma área que revela columnas de dominancia ocular. La imagen procesada del registro óptico de esa misma parte revela áreas de dominancia ocular. La imagen se obtuvo utilizando un colorante sensible a la actividad neuronal y activando alternativamente los dos ojos del mono con estímulos visuales; en rojo está marcada la zona donde terminan las conexiones del ojo derecho y en violeta las del ojo izquierdo. En esta visión tangencial, las columnas de dominancia ocular aparecen como objetos alargados, ya que el eje columnar es perpendicular a la cámara. (Experimento realizado con Clay Reid y José Manuel Alonso, de la Universidad Rockefeller.)

que el desarrollo de las columnas de dominancia ocular de la corteza visual del gato estaba controlado por la actividad neuronal generada por estímulos visuales.

Sus resultados demostraron que, durante un período del desarrollo del animal (el llamado período crítico), el patrón de actividad neuronal generado por los estímulos externos podía cambiar las conexiones tálamo-corticales, en virtud de la regla según la cual las conexiones que se utilizan quedan asentadas, en tanto que desaparecen las conexiones menos utilizadas. Así, en nuestro símil telefónico, la red telefónica de una gran ciudad sería modificable durante los primeros meses, pasados los cuales cada usuario sólo estaría conectado a aquellos números con los que habló con más frecuencia.

Esta regla empleada por el sistema visual constituye un ejemplo de la llamada "regla de Hebb", postulada en 1946 por el psicólogo Donald O. Hebb, de la Universidad McGill, más conocida por su versión popular y axiomatizada por Wolf Singer: "las neuronas que disparan a la vez, acaban estableciendo conexiones entre sí".

El descubrimiento del período crítico revolucionó el estudio del desarrollo del cerebro. Sugería la posibilidad de que el cerebro de un animal adulto tuviese una estructura que viniera determinada por los estímulos externos recibidos durante el período neonatal o postnatal; en el caso del hombre, durante la infancia. No obstante, en sus artículos originales, Wiesel y Hubel también concluyeron que, a diferencia de las columnas de dominancia ocular, muchas otras funciones de las células corticales parecían ser insensibles a manipulaciones de la actividad sensorial. Sus resultados indicaron que ambos tipos de mecanismos, los que dependen de la actividad neuronal y los que no dependen de ésta (y que pueden corresponder a mecanismos de reconocimiento molecular), actúan en concierto en el desarrollo de la corteza visual.

Desde que Wiesel y Hubel publicaron sus clásicos experimentos hace treinta años, el estudio de la actividad neuronal a lo largo del desarrollo ha avanzado relativamente poco. El trabajo posterior de Pasko Rakiç demostró que la actividad intrínseca del sistema visual del feto bastaba para asegurar el desarrollo normal de las conexiones tálamo-corticales en el mono. Este resultado, junto a los experimentos farmacológicos de Michael Stryker, Bill Harris, Carla Shatz y recientes estudios anatómicos de Singer y Larry Katz, resaltó la importancia de los patrones de actividad intrínseca; por tal se entiende la actividad espontánea generada por el sistema nervioso, al margen de la estimulación sensorial, en el desarrollo de conexiones retino-talámicas, tálamo-corticales y córtico-corticales.

Con esta informacion de base comenzamos nuestro trabajo, realizado con Larry Katz en el laboratorio de Wiesel en la Universidad Rockefeller, y posteriormente en el propio laboratorio de Katz en la Universidad de Duke. Nos propusimos estu-

diar el patrón de actividad multicelular connatural al desarrollo de la corteza; pensábamos, en efecto, que las características espacio-temporales de este patrón podrían ser determinantes de la organización cortical del animal adulto. A causa de las dificultades técnicas en el registro electrofisiológico, que resulta ideal para estudiar una o pocas neuronas pero es inadecuado para abordar simultáneamente la actividad de cientos o miles de neuronas, se dispone de escasa información sobre patrones multicelulares de actividad en el cerebro.

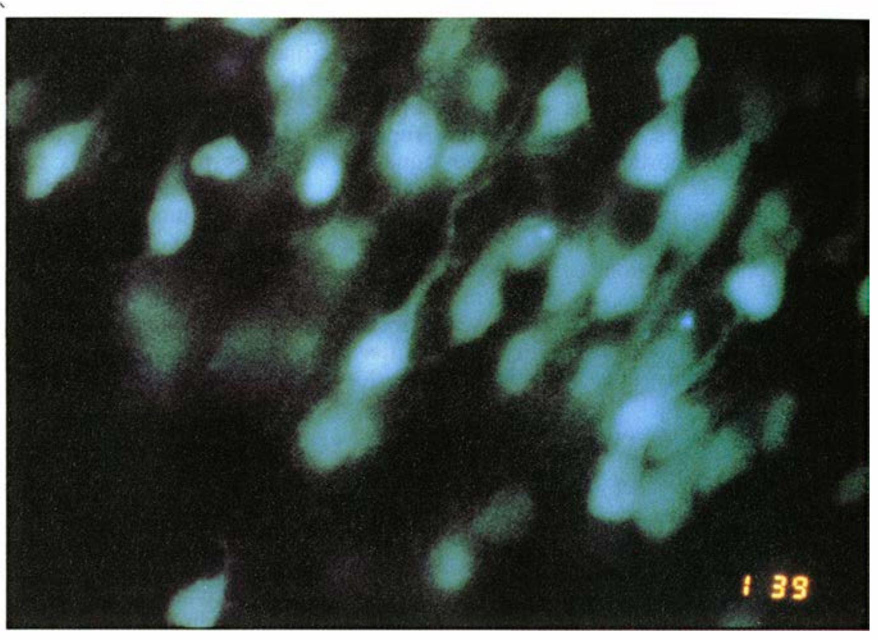
De ahí que optamos por acudir a las nuevas técnicas de registro óptico. Se funda éste en la transformación de la actividad neuronal en una señal óptica, a través, por ejemplo, de un colorante sensible a la concentración intracelular de calcio; la señal emitida se mide luego con cámaras muy sensibles acopladas a microscopios de fluorescencia. Conviene tener presente que, en líneas generales, toda actividad neuronal produce aumentos muy significativos de la concentración intracelular de calcio.

Semejante enfoque no hubiera sido posible sin la contribución del químico Roger Tsien, quien ha sintetizado toda una gama de colorantes sensibles a distintos iones y ha inventado métodos para introducirlos en muchos tipos de células sin necesidad de difíciles inyecciones intracelulares. En nuestro caso, decidimos utilizar el colorante sensible al calcio fura-2 y estudiar el problema en rodajas de corteza visual y somatosensorial de ratas recién nacidas.

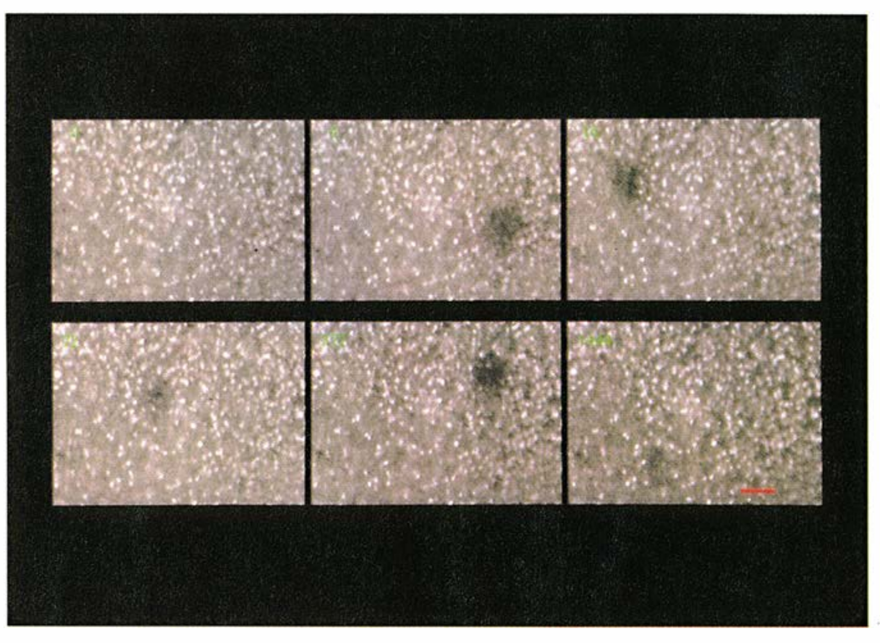
El uso de cortes (o rodajas) de cerebro permite aislar *in vitro* la zona de interés, que se mantiene viva en cámaras especiales, y facilita la experimentación detallada durante un máximo de doce horas. Para nuestro trabajo, los cortes constituían la preparación ideal, pues admiten la aplicación de refinadas técnicas ópticas y electrofisiológicas y conservan, al propio tiempo, un 90 % de conexiones corticales intrínsecas. No obstante, todo experimento realizado en cortes de cerebro deberá corroborarse en comprobaciones de los resultados *in vivo*, ya que puede haber diferencias entre el comportamiento del circuito aislado en cortes y ese mismo circuito funcionando en el cerebro entero del animal.

Nuestra primera observación, realizada por casualidad, fue que el colorante fura-2 teñía las neuronas en un corte de cerebro de rata recién nacida. El hallazgo no dejó de sorprendernos, pues los colorantes sensibles al calcio no tiñen rodajas de cerebro adulto. Pudimos así ver el patrón multicelular de actividad intrínseca presente espontáneamente en los cortes. Descubrimos con asombro cómo grupos de 10 a 100 neuronas, que ocupaban un territorio aproximadamente circular de unos 100 micrometros de diámetro, aumentaban y disminuían espontáneamente su concentración de calcio, cual si se estuviesen activando todas a la vez.

Estos grupos co-activos ocupaban territorios discretos; decidimos denominarlos "dominios neuronales", porque dividían los cortes histológicos en áreas vecinas a modo de piezas de un rompecabezas. Los dominios podían repetirse en los mismos lugares de un corte, lo que nos indicó



4. CORTE de corteza de rata neonatal incubada con el colorante sensible al calcio fura-2 AM. En la microfotografía se aprecia la tinción de varias neuronas, algunas de las cuales tienen cuerpos piramidales y dendritas apicales.



5. ACTIVIDAD NEURONAL ESPONTANEA de un corte tangencial de corteza de rata neonatal, teñido con fura-2, en secuencia fotográfica. Las neuronas neonatales se activan espontáneamente formando dominios neuronales. Cada punto blanco en las imágenes es una neurona. Al activarse, las neuronas aumentan su concentración de calcio, lo que resulta en una disminución de la señal óptica, por lo que se oscurecen durante la película. En muchas imágenes se aprecian áreas de unos 100 micrometros de diámetro que se oscurecen a la vez. Estas áreas de co-activación forman un dominio neuronal. La escala, en rojo, equivale a 100 micrometros.

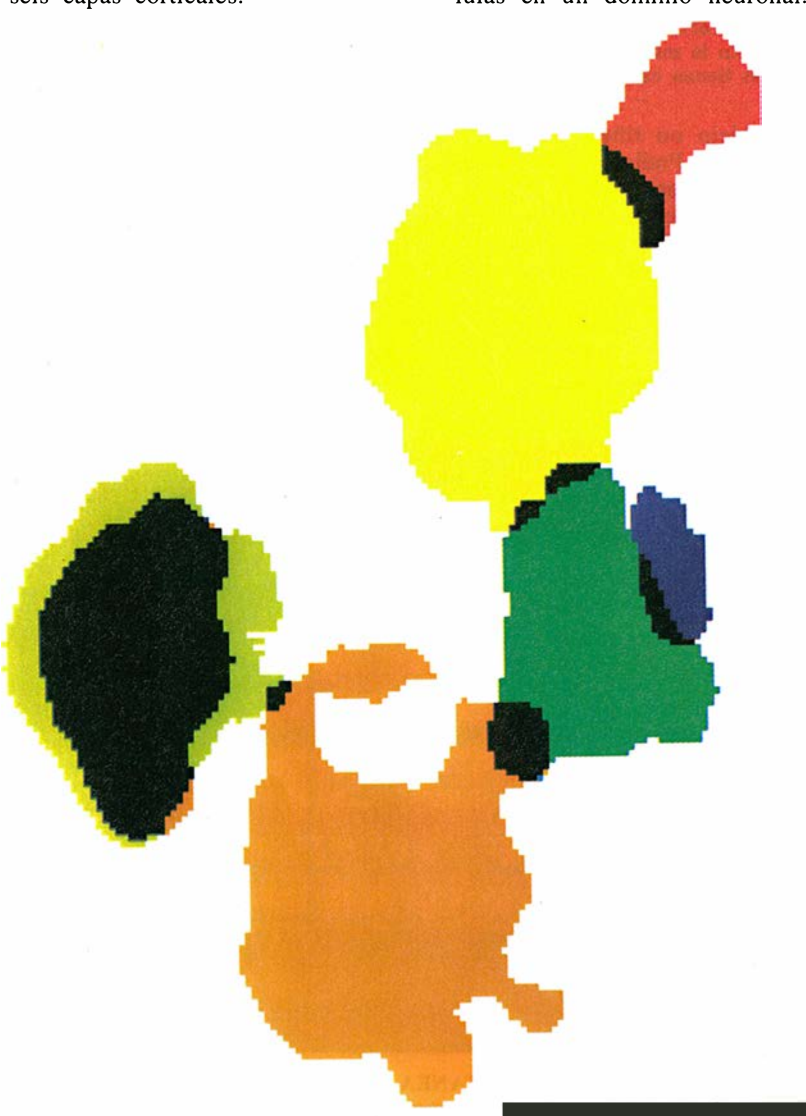
que tenían una estructura fija a lo largo de las dos a cuatro horas que duraba el experimento. Además, el hecho de que los dominios se respetaban unos a otros, con mínima superposición de bordes, sugería que la posición de los mismos estaba determinada por la circuitería conservada en los cortes.

Los dominios fueron descubiertos en cortes tangenciales, es decir, rodajas cortadas horizontalmente en un plano paralelo al de la superficie de la corteza. Para averiguar cuál era su forma tridimensional, hicimos experimentos en rodajas coronales, es decir, cortadas verticalmente en un plano perpendicular a la superficie de la corteza. En estas rodajas, paralelas al plano del circuito cortical, los dominios presentaban formas columnares, abarcando en muchos casos las seis capas corticales.

Los dominios, por tanto, eran columnas cilíndricas de unos 100 micrometros de diámetro que se extendían desde la substancia blanca a la superficie pial de la corteza. Puesto que los dominios tenían bordes discretos y tamaños similares, dedujimos que formaban una arquitectura modular, análoga a la de un mosaico. Su estructura columnar nos sugirió que representaban una forma precursora de las columnas en la corteza adulta postuladas por Lorente de Nó, y encontradas por Mouncastle y Hubel y Wiesel.

Como es corriente en la investigación científica, antes de preguntar el porqué, conviene entender el cómo. En nuestro caso, nos preguntamos cuál era el mecanismo responsable de la co-activación de las células en un dominio neuronal. Para ello aplicamos una batería de tests farmacológicos con el fin de bloquear específicamente el fenómeno.

Para nuestra sorpresa, la neurotoxina tetrodotoxina, que bloquea los canales de sodio y consiguientemente la transmisión de impulsos nerviosos por axones, no inhibió la aparición de los dominios neuronales. Este resultado indicaba que la co-activación de las células de un dominio podía ser mediada por un tipo de conexiones entre dendritas de neuronas llamadas uniones de hendidura ("gap junctions"). Tales uniones son complejos proteínicos compuestos por doce subunidades que forman un túnel entre dos células cercanas, permitiendo el paso de iones y pequeños metabolitos. Aunque queda mucho por conocer sobre la función de estas estructuras, se ha demostrado que las neuronas acopladas eléctricamente entre sí por uniones de hendidura pueden activarse con idéntica eficacia, si no mayor, que las neuronas conectadas por sinapsis.



6. LOS DOMINIOS forman mapas modulares. Este corresponde a los dominios neuronales que ocurrieron espontáneamente en un corte tangencial de cerebro de rata. A cada dominio se le ha asignado un color distinto; el negro representa las zonas de superposición entre dominios. Los dominios tienden a no superponerse, pero pueden repetirse en los mismos lugares (*verde claro a la izquierda*). Escala = 100 micrometros.

Tres tipos de pruebas experimentales corroboraron que la co-activación de neuronas en un dominio se debía a las uniones de hendidura. El primer experimento consistió en bloquear los dominios neuronales con inhibidores farmacológicos de las uniones de hendidura. Los dos que utilizamos, el halotano y el octanol, bloquearon reversiblemente los dominios a las mismas concentraciones en que inhiben uniones de hendidura en otros sistemas estudiados anteriormente.

El segundo experimento estribó en representar el acoplamiento entre neuronas mediante la inyección en una de ellas de un marcador histológico que cruce las uniones de hendidura. A sugerencia de Carla Shatz, usamos un derivado de la biotina, la neurobiotina, que Richard Vaney había empleado con anterioridad en la retina. En estos experimentos, realizados por Alejandro Peinado, la inyección de neurobiotina en una neurona provocó el marcaje de 10 a 80 neuronas más, dispuestas en inmediata vecindad de la inyectada; formaban, además, agrupaciones columnares de dimensiones similares a los dominios neuronales representados con el registro óptico.

La tercera línea de prueba partió de experimentos que combinaban la electrofisiología intracelular con el registro óptico. Los realicé en colaboración con David Tank en los laboratorios Bell. En estos experimentos en presencia de bloqueantes sinápticos, la activación de una célula mediante la inyección intracelular

de corriente por medio de una micropipeta de vidrio provocó la activación simultánea de otras células cercanas, demostrándose las consecuencias electrofisiológicas del acoplamiento.

Los experimentos electrofisiológicos nos permitieron medir directamente la magnitud del acomplamiento eléctrico entre dos células: aplicando un electrodo a la primera se miden las respuestas eléctricas emitidas por la segunda. Obtuvimos un acoplamiento eléctrico de un 25 por ciento como mínimo; es decir, un pulso de 10 milivolts de diferencia de potencial en la célula A se transmite a la célula B como un pulso de 2,5 milivolts. La magnitud de este acoplamiento, notable, resulta suficiente para provocar una reacción en cadena dentro de un grupo de neuronas acopladas entre sí al activarse una de ellas.

Por último, para obtener más información sobre el comportamiento temporal de estos dominios realizamos registros ópticos con la mayor resolución temporal que permitían nuestras técnicas, consiguiendo una imagen cada 33 milisegundos.



7. ESTRUCTURA COLUMNAR de los dominios, ejemplificada por los registrados ópticamente en un corte histológico coronal de corteza neonatal de rata. Nótese que el punto de vista es perpendicular al de las figuras 3, 5 y 6. En esta vista coronal, los dominios tienen formas alargadas en el mismo eje que el del circuito. Escala = 200 micrometros.

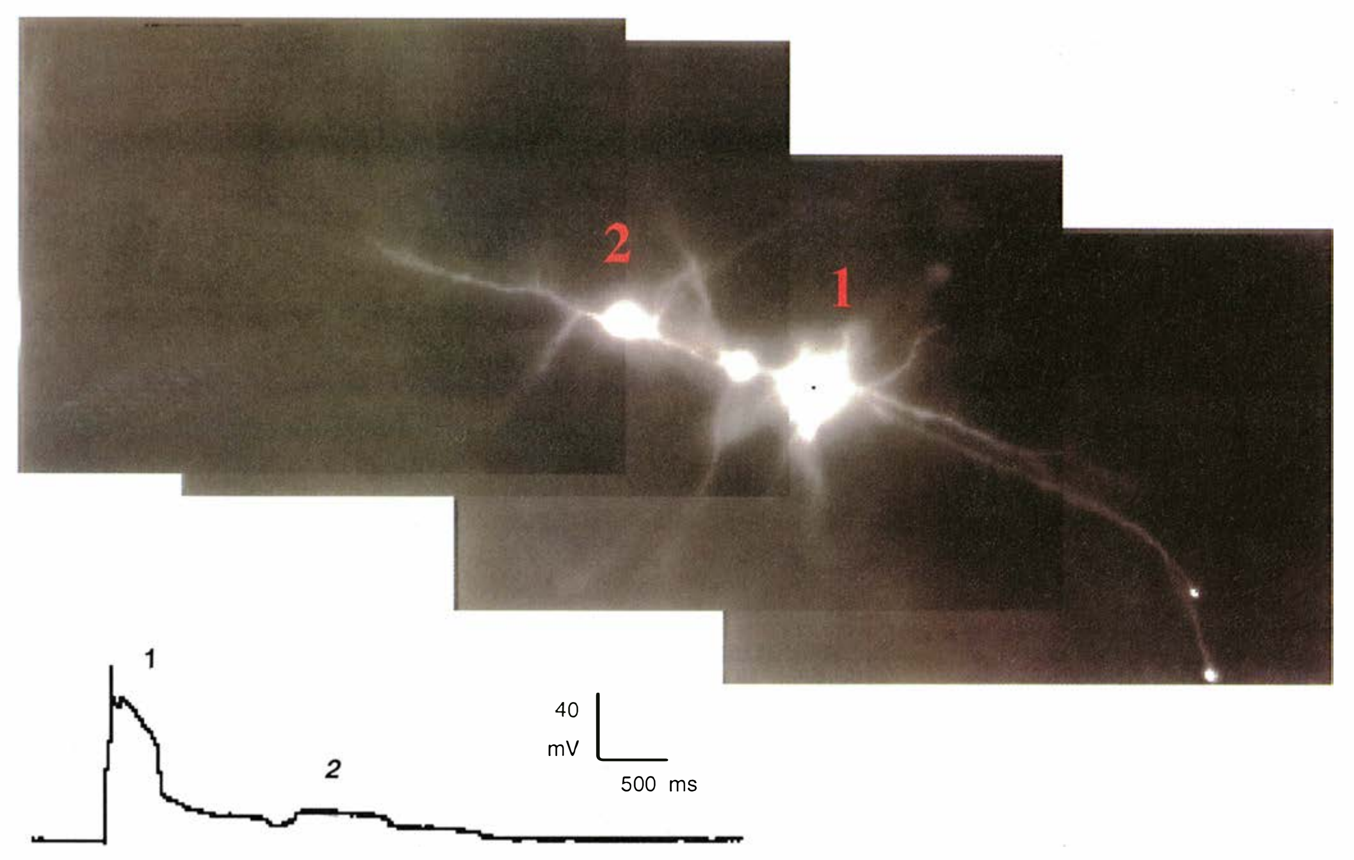


8. UNIONES DE HENDIDURA ("gap junctions") cruzadas por el marcador neurobiotina, inyectado intracelularmente en una neurona. La corteza neonatal tiene grupos columnares de neuronas acopladas por uniones de hendidura. En esta microfotografía de corte histológico coronal de rata neonatal, se puede apreciar que la inyección resultó en la tinción de muchas otras neuronas, que están dispuestas en formas columnares muy semejantes a los dominios registrados ópticamente. Cortesía de Alejandro Peinado, de la Universidad Albert Einstein.

Estos experimentos, realizados en cortes tangenciales, demostraron que todos los dominios tenían una dinámica interna similar; empezábase en el centro por la activación de una o dos células disparadoras ("trigger cells"), que reclutaban posteriormente a células secundarias de su alrededor. La activación del dominio entero duraba aproximadamente un segundo. Después, y en un período de diez segundos, la concentración de calcio volvía lentamente a la normalidad en todas las células. La velocidad de activación variaba bastante de una célula a otra en el seno del dominio, con una media de unos 100 micrometros por segundo. Esa velocidad es mucho más rápida que la difusión intracelular de calcio, estimada aproximadamente por George Augustine y Erwin Neher en células cromafines en unos 10 micrometros por segundo, pero más lenta que la propagación de impulsos eléctricos por conexiones habituales (sinapsis) en el sistema nervioso, que puede llegar a ser de metros por segundo con retrasos de unos pocos milisegundos por cada sinapsis.

En el caso de acoplamiento eléctrico mediado por uniones de hendidura, la velocidad de activación abona dos posibles explicaciones de la co-activación en un dominio neuronal: o bien la señal que cruza las uniones de hendidura es una señal eléctrica con un retraso considerable hasta activar a la neurona secundaria, o bien se trata de una propagación regenerativa de un segundo mensajero intracelular, como el calcio, AMP cíclico o el inositol-3-fosfato. Ha quedado demostrada la existencia de "olas" de segundos mensajeros intracelulares en otros sistemas más sencillos y que registran velocidades de propagación similares a las que medimos en los dominios.

¿Qué significado encierra la co-activación de neuronas en la formación de dominios durante el desarrollo de la corteza? Para contestar la pregunta, hemos de entender el desarrollo del acoplamiento neuronal por medio de uniones de hendidura. Como mencioné antes, los colorantes del tipo del fura-2 no tiñen rodajas de corteza adulta, por lo que nos ha sido imposible, hasta ahora, realizar los mismos experimentos de registro óp-



9. ACOPLAMIENTO DE NEURONAS por uniones de hendidura. Las neuronas acopladas pueden activarse eléctricamente entre sí. La microfotografía muestra, en efecto, el acoplamiento de tres neuronas durante una inyección intracelular de un colorante sensible al calcio. Se distinguen los tres cuerpos celulares, las dendritas apicales (*izquierda*) y dos axones (*derecha*). Abajo aparece el registro electrofisiológico de la célula numero 1, durante la estimulación intracelular en presencia de bloqueantes sinápticos y de bloqueantes de canales de sodio y potasio. La neurona 1 dispara primero y provoca la activación de la neurona 2, cuya señal eléctrica puede percibirse con el electrodo desde la célula 1.

tico que realizamos en cortes histológicos de corteza postnatal. Pero gracias a la visualización del acoplamiento con neurobiotina hemos podido comprobar que el acoplamiento entre neuronas desaparece al madurar la corteza; coincide esa desaparición con el final del período crítico del desarrollo. Fundados en ello, hemos aventurado la hipótesis según la cual los dominios neuronales unen entre sí a células que posteriormente estarán comunicadas con sinapsis habituales.

Según nuestro modelo, las uniones de hendidura, que desaparecen durante el desarrollo, son reemplazadas en su función por conexiones sinápticas. De hecho, el acoplamiento inicial determinaría, quizá por la regla de Hebb, que las conexiones sinápticas maduras ocurran en el lugar donde ocurren. Así, la arquitectura modular de dominios modulares sería el armazón donde se montaría la entramada organización modular de la corteza cerebral madura.

Estos resultados indican que la corteza neonatal es una red de neuronas acopladas entre sí, y nos sugieren la posibilidad de que muchas de las interacciones entre neuronas corticales se produzcan, durante el desarrollo, a través de uniones de hendidura, y no exclusivamente a través de las habituales sinapsis, según se creía hasta ahora. De hecho, una paradoja nunca bien explicada por la hipótesis de la actividad neuronal es que, durante el período crítico, la actividad eléctrica neuronal es muy pequeña, lo que está en manifiesta contradicción con los profundos cambios que esta actividad produce en el patrón de conexiones. Quizá la resolución de la paradoja estribe en admitir que la señal que produce estos cambios no presenta una forma eléctrica, sino bioquímica, a la manera de un segundo mensajero, y que pase de una neurona a otra a través de uniones de hendidura.

Por último, una de las lecciones que hemos aprendido es que la corteza no constituye presumiblemente un caso especial de desarrollo, ya que hemos descubierto dominios neuronales en muchas otras partes del cerebro neonatal y se han encontrado uniones de hendidura durante el desarrollo precoz de sistemas muy dispares: la hidra, el ala de *Drosophila* o el embrión de ratón. Aunque los resultados de estas otras investigaciones, realizadas por Anne Warner, Norton Gilula y Scott Fraser, no son todavía definitivos, resulta curioso que, en los tres casos, las uniones de hendidura aparezcan implicadas en la formación de patrones multicelulares. Cabe imaginar que en la arquitectura modular de la corteza (otro ejemplo de formación de patrón multicelular) la naturaleza haya utilizado mecanismos similares a otras partes del cuerpo o en otros animales muy lejanos en la escala evolutiva.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POSTNATAL DEVELOPMENT OF THE VISUAL CORTEX AND THE INFLUENCE OF THE ENVIRONMENT. T. N. Wiesel. *Nature* 299, págs. 583-592, 1982.

IMPULSE ACTIVITY AND THE PATTERNING OF CONNECTIONS DURING CNS DEVELOPMENT. C. J. Shatz. *Neuron* 5, páginas 745-756, 1990.

NEURONAL DOMAINS IN DEVELOPING NEOCORTEX. R. Yuste, A. Peinado y L. C. Katz. *Science* 257, págs. 665-669, 1992.

La Luna y el origen del hombre

Si la Luna no existiera, la orientación del eje de la Tierra no sería estable y experimentaría grandes variaciones caóticas en el curso del tiempo. Los cambios climáticos subsecuentes habrían obstaculizado el desarrollo de la vida

Jacques Laskar

A todos nos es familiar el ritmo de las estaciones, cuya sucesión es el resultado de la inclinación del ecuador respecto al plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Esta inclinación de 23° 27′, que los astrónomos llaman oblicuidad, es también la causa de la existencia de los círculos polares, donde los días y las noches duran aproximadamente seis meses. El reparto de la cantidad de calor que llega a la superficie de la Tierra depende de la oblicuidad; ésta es, pues, uno de los elementos fundamentales para la comprensión del clima. Los cálculos efectuados en la Oficina de Longitudes de París muestran que la Luna estabiliza las posibles oscilaciones de la oblicuidad y que actúa, por tanto, como regulador climático de la Tierra.

En el año 120 a. de C., Hiparco descubrió que la dirección del eje de rotación de la Tierra no es fija; describe un cono en el espacio con un período de unos 26.000 años. Este movimiento, la precesión de los equinoccios, se debe al ensanchamiento ecuatorial de la Tierra y al par de fuerzas que sobre él ejercen la Luna y el Sol. Es muy fácil observar la precesión del eje de rotación de un cuerpo sólido en un campo gravitatorio; basta con hacer que una peonza gire sobre una mesa. Una de las consecuencias de este fenómeno es que el eje de la Tierra no apunta siempre a la Estrella Polar, sino que describe un amplio círculo sobre la bóveda celeste.

La precesión de los equinoccios constituye, por otra parte, una importante objeción contra las lucubraciones de los adeptos a la astrología, pues ha introducido un desfase tal entre el calendario y el movimiento aparente del Sol que en la fecha correspondiente al signo de Aries el Sol se encuentra ahora en la constelación de Piscis.

La precesión influye en el clima de la Tierra. La órbita terrestre no es circular, sino, como Kepler mostró en 1609, aproximadamente elíptica, con el Sol en uno de los focos de la elipse. La excentricidad de la elipse (que mide su grado de achatamiento) es pequeña (0,017), pero basta para que la cantidad de calor recibida en la superficie de la Tierra en el perihelio, posición de máxima proximidad de la Tierra respecto al Sol, sea mayor que la cantidad que le llega en el afelio, la de máximo alejamiento.

En la actualidad, el paso por el perihelio tiene lugar el 4 de enero, durante el invierno boreal; por tanto, el alejamiento variable de la Tierra al Sol rebaja el contraste de las estaciones en el hemisferio norte y lo acentúa en el hemisferio sur. Dentro de 13.000 años, el efecto será el contrario y los contrastes entre las estaciones se acentuarán más en el hemisferio norte. La precesión de los equinoccios modifica, pues, el reparto de la insolación en un lugar dado de la Tierra en el curso del año. Sin embargo, parece que las variaciones de la excentricidad y de la oblicuidad de la órbita de la Tierra causan cambios climáticos mucho más importantes.

La teoría astronómica de los paleoclimas

Para Kepler, la Tierra describía una elipse inmutable. Newton socavó ese equilibrio al mostrar que la masa de los otros planetas del sistema solar perturbaba la órbita de la Tierra, que es, pues, una elipse sólo en primera aproximación: ni la excentricidad de la Tierra ni su oblicuidad permanecen fijas. LeVerrier (célebre por haber descubierto, mediante el cálculo de las perturbaciones de Urano, el planeta Neptuno en 1864) calculó las variaciones a muy largo plazo, llamadas variaciones seculares, de la excentricidad de la Tierra. Proseguía los trabajos de Laplace al respecto, de un poco antes de la Revolución francesa. Basándose en estas soluciones de LeVerrier para el movimiento orbital de la Tierra, el astrónomo yugoslavo Milutin Milankovitch formuló, en 1941, la hipótesis según la cual los grandes períodos glaciales del Cuaternario se debían a las variaciones de la insolación en las altas latitudes inducidas por las variaciones seculares de la órbita y de la orientación axial de la Tierra. No se aceptó esta teoría inmediatamente; los cambios de la insolación no parecían suficientes para engendrar variaciones de temperatura capaces de desencadenar una glaciación.

La teoría se ha consolidado mucho en los últimos veinte años. Las medidas isotópicas de las proporciones de oxígeno O^{18}/O^{16} efectuadas por el grupo de John Imbrie aportan datos del espesor de los casquetes polares, gracias a las cuales se han podido evaluar las temperaturas medias de los mares en las épocas correspondientes.

Estas medidas, basadas en el análisis de los carbonatos presentes en testigos de sedimentos marinos, permiten reconstruir los climas del pasado a lo largo de los últimos tres millones de años. Hay incluso archivos geológicos que, aunque mucho menos precisos, dejan remontarnos hasta 200 millones de años atrás. Por otra parte, mejores modelos de la respuesta climática a las variaciones de la órbita terrestre muestran que ciertos efectos secundarios (así, la extensión de los casquetes polares o los cambios de composición de la atmósfera) pueden multiplicar el efecto de los cambios de insolación.

Uno de los elementos esenciales en el estudio de las variaciones de la insolación de la Tierra es el cálculo de las variaciones de su oblicuidad

JACQUES LASKAR es astrónomo e investigador del Centro Nacional de Investigación Científica francés y del grupo de astronomía y sistemas dinámicos de la Oficina de Longitudes de París.

bajo la influencia de las perturbaciones planetarias. En un millón de años, esta variación no es sino de 1,3 grados alrededor del valor medio de 23,3 grados. Esto, que puede parecer muy poco, lleva consigo variaciones de cerca del 20 por ciento en la insolación que se recibe en verano a 65 grados de latitud norte. Ahora bien, la cantidad suplementaria de calor durante el verano en las latitudes altas es un dato importante para el estudio de los climas, ya que funde los hielos e impide la extensión de los casquetes polares.

La pequeñez de las variaciones de la oblicuidad de la Tierra ha sido un factor determinante de la regularidad climática de los últimos millones de años, y gracias a ella pudo aparecer la vida organizada tal como la conocemos. Los períodos glaciales constituyen cambios climáticos importantes, aunque no han bastado para alterar de modo duradero las condiciones de vida en la superficie de la Tierra.

Variaciones de la oblicuidad de la Tierra

Las perturbaciones debidas a los otros planetas hacen que la órbita de la Tierra gire en el espacio con un movimiento que puede representarse de manera aproximada como la resultante de diversas rotaciones uniformes, cuyos períodos van de 40.000 a varios millones de años, y cada una de las cuales proviene de la influencia de uno de los planetas. El efecto que este complicado movimiento ejerce sobre nuestra peonza terrestre causa las pequeñas oscilaciones de su oblicuidad.

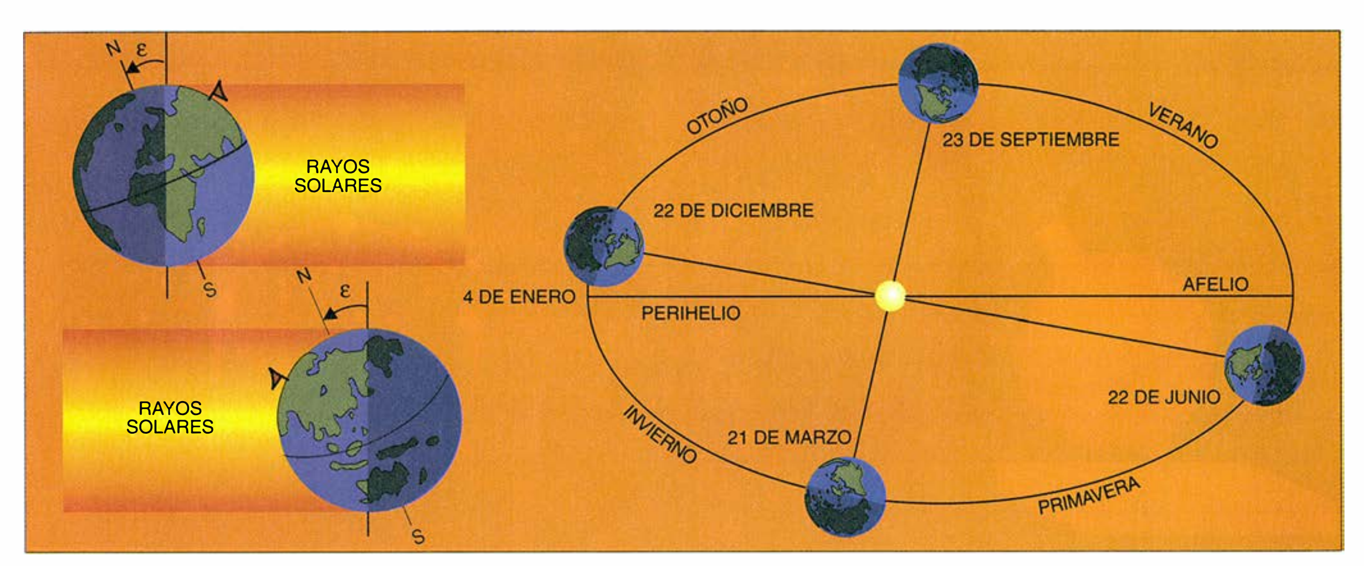
Si el período de excitación producida por este movimiento de la órbita de la Tierra es próximo al período de la precesión de su eje, interviene un fenómeno físico clásico: la resonancia. Se produce, por ejemplo, resonancia cuando se empuja un columpio en el momento oportuno, esto es, cada vez que llega a su punto más alto. Bastará un suave empujón para amplificar las oscilaciones del columpio (sobre todo si no hay rozamiento). Por contra, si se empuja el columpio en cualquier otro instante, no ocurrirá nada de particular.

En lugar de utilizar los períodos, tendremos en cuenta las velocidades de rotación de estos diferentes movimientos. Como todos los movimientos de precesión de los que hablaremos son muy lentos, la unidad empleada será el segundo de arco por año o, abreviadamente, segundo por año. Una velocidad de rotación de un segundo por año corresponde, pues, a un período de $360 \times 3600 = 1.296.000$ años. Abusaré ligeramente del lenguaje y llamaré frecuencias a estas velocidades angulares de rotación.

Adoptando ya estas convenciones, la frecuencia de precesión de la Tierra es de 50,47 segundos por año, mientras que las frecuencias principales del movimiento de la órbita de la Tierra van de 26,33 segundos por año hasta prácticamente 0,67 segundos por año, siendo las más importantes las de 18,85 y 17,75 segundos por año. Estamos, pues, lejos de la resonancia, lo que explica que las variaciones de la oblicuidad de la Tierra sean pequeñas. No sucede lo mismo en Marte, cuya frecuencia de precesión es de 7,5 segundos por año para una oblicuidad actual de 25,2 grados; William Ward, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, hizo notar que Marte presentaba variaciones de oblicuidad importantes (10 grados) a causa de la proximidad de las resonancias seculares orbitales.

¿Y si quitásemos la Luna?

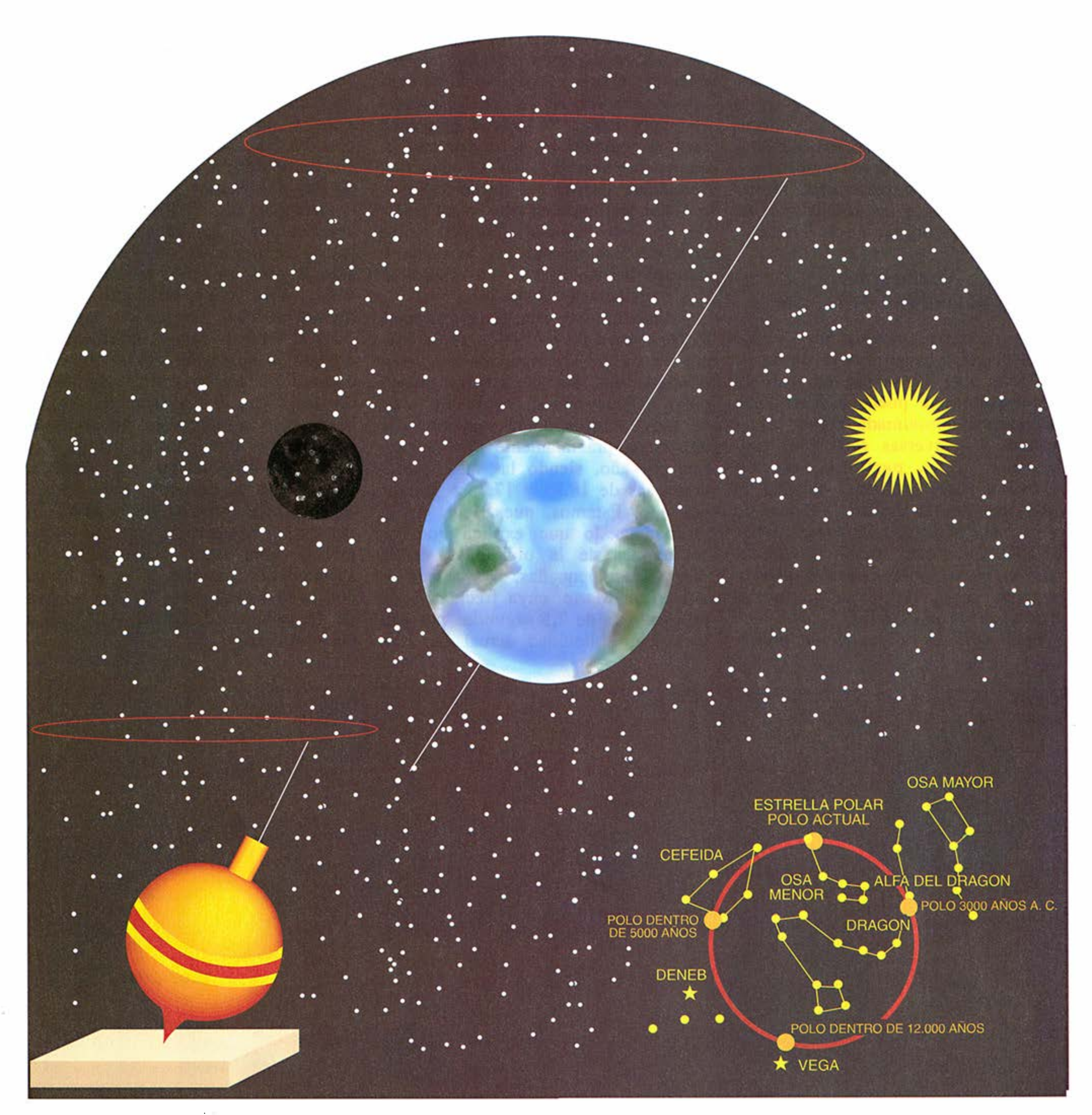
Por supuesto, no se trata de hacer, o de incitar a nadie a que haga semejante cosa, sino de comprender, mediante simulaciones numéricas con ordenador, la importancia de la acción de la Luna sobre la dinámica de la Tierra. El par gravitatorio que se ejerce sobre el ensanchamiento ecuatorial de la Tierra proviene en sus dos tercios de la acción de la Luna y, en aproximadamente un tercio, del Sol. Sin la Luna, la frecuencia de precesión de la Tierra pasaría de 50,47 segundos por año a aproximadamente 15,6 segundos por año, acercándose a las frecuencias orbitales de la Tierra, lo que llevaría consigo la posibilidad de resonancia. En 1982, Ward había estudiado el problema mediante un modelo simplificado y había llegado a la conclusión de que la supresión de la Luna entrañaría variaciones de la oblicuidad de la Tierra del orden de las de Marte. No obstante, en ausencia de la Luna, la Tierra habría tenido una velocidad de rotación más elevada, con lo que su ensanchamiento ecuatorial habría crecido. Según Ward, el mayor par solar sobre ese ensanchamiento aumentado compensaría la ausencia de par debido a la Luna, con lo que finalmente las variaciones de la oblicuidad serían similares a las observadas.



1. LA ALTERNANCIA DE LAS ESTACIONES depende de la oblicuidad ε de la Tierra (*a*) y de la precesión de los equinoccios (*b*). En verano, la cantidad de calor solar recibida en el hemisferio norte es mayor que en el hemisferio sur. Según el valor del ángulo de precesión, la Tierra se encontrará en el punto de máxima proximidad al Sol (perihelio) durante el verano del hemisferio norte o, como pasa actualmente, durante su invierno. El resultado de ello es un aumento, o una disminución, del contraste de las estaciones.

En la Oficina de Longitudes hemos estudiado este problema utilizando un modelo mucho más preciso del movimiento de la Tierra. Disponíamos de la solución del movimiento orbital de la Tierra y de los otros planetas que yo había calculado previamente para un período de 400 millones de años. Esta solución me había permitido mostrar, en 1989, que el movimiento orbital de los planetas internos (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) es caótico. Cabía, pues, estudiar numéricamente, para tiempos muy largos, los cambios de orientación axial de la Tierra producidos por sus propias variaciones orbitales.

Al principio simulamos la desaparición súbita de la Luna y observamos qué le ocurría a la oblicuidad de la Tierra a lo largo de un millón de años, un tiempo bastante corto porque con él los posibles efectos de la naturaleza caótica del movimiento orbital no son todavía apreciables. Las variaciones de la oblicuidad de la Tierra resultantes fueron del orden de 15 grados, y las de la insolación a 65 grados de latitud norte mucho más importantes que anteriormente. Si las variaciones en el pasado de la insolación en las altas latitudes fueron realmente responsables, como sostiene la teoría de Milankovitch, de los períodos glaciales, es muy probable que las variaciones indicadas en la figura 3 indujesen en la superficie de la Tierra cambios de temperatura aún mayores.



2. LA PRECESION DE LOS EQUINOCCIOS. La Tierra es un poco achatada por los polos y ensanchada en el ecuador. Bajo la acción gravitatoria de la Luna y el Sol, el eje de rotación terrestre describe un cono, como una peonza. La dirección del eje de la Tierra traza un círculo sobre la bóveda celeste en unos 26.000 años. Hace 5000 años, la dirección del polo norte venía dada por la estrella alfa del Dragón y no por la Polar. Dentro de 13.000 años, esta dirección será la de Vega.

Nuestro objetivo, sin embargo, no es quitar la Luna, sino saber qué evolución hubiera tenido la Tierra sin la Luna; se plantea, pues, el problema del origen de ésta.

El origen de la Luna

La Luna presenta grandes problemas a los astrónomos. Su masa, 1/81 de la masa de la Tierra, es muy considerable para un satélite y constituye un caso único en el sistema solar. Solamente Júpiter, Saturno y Neptuno poseen satélites de masa equiparable, pero las masas de esos planetas son, respectivamente, 318, 95 y 17 veces la de la Tierra. La formación de la Luna supone, por tanto, un problema especial, y se han avanzado varias hipótesis que podrían explicarla.

En el cuadro de la fisión, la Tierra, en rotación muy rápida (2-3 horas), pierde una parte de su manto bajo el efecto de la fuerza centrífuga. Este modelo está abandonado, pues cuesta explicar una rotación inicial tan rápida y además no da cuenta de la notable diferencia entre las composiciones químicas de la Tierra y de la Luna ni, sobre todo, que la Luna no se encuentre en el plano del ecuador, sino a cinco grados del plano de la órbita de la Tierra.

La Luna habría podido formarse al mismo tiempo que la Tierra por acumulación de materia en órbita alrededor de ésta. Tal hipótesis explica que la Luna se halle próxima al plano de la eclíptica, pero no la sensible diferencia de composición química entre la Tierra y la Luna.

Según la hipótesis de la captura, el campo gravitatorio de la Tierra capturó la Luna, que se había formado en una región vecina del espacio. Se proponen actualmente dos modos de captura: uno "dulce" y otro "brutal"; en éste, un cuerpo de gran masa choca con la Tierra y los restos se aglutinan después para formar la Luna. El problema que plantean estas hipótesis, de las que la última goza hoy de mayor aceptación, es la pequeña probabilidad de un suceso semejante. Esto es insatisfactorio, pues el principio de la "mediocridad" querría que los sucesos observados fueran sucesos genéricos y no excepcionales.

Historia de la Luna

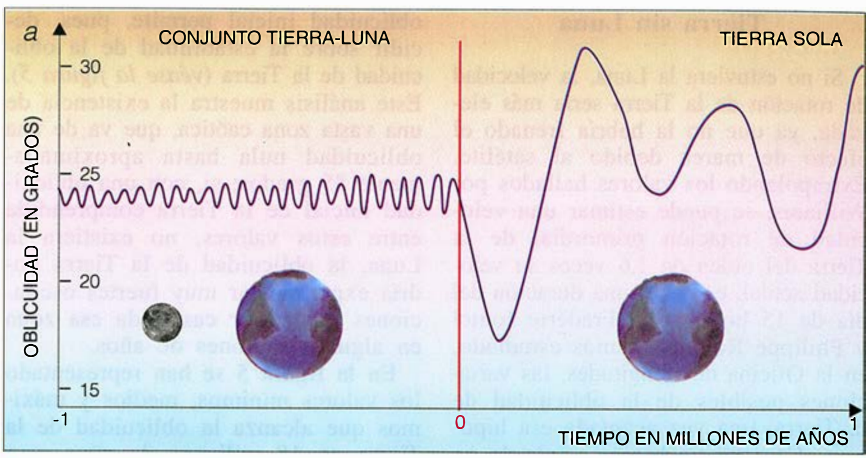
Si bien el origen de la Luna sigue siendo enigmático y objeto de conjeturas varias, resulta viable reconstruir su historia hasta una época muy remota en el tiempo.

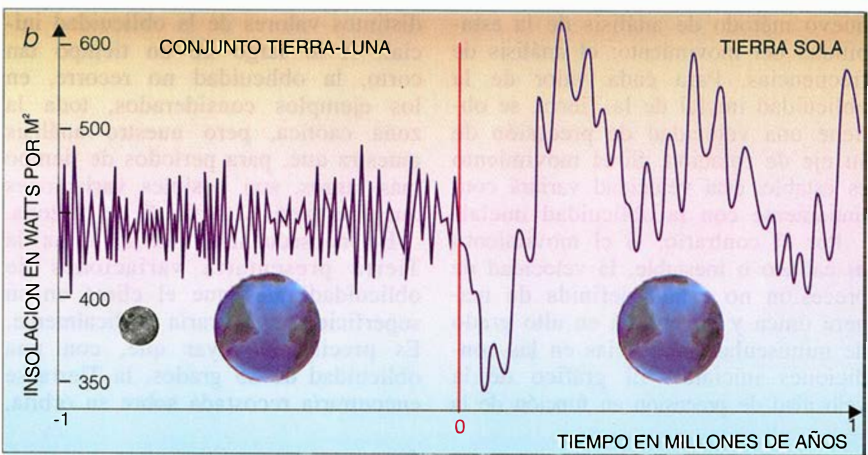
La Luna ejerce sobre la Tierra una fuerza de atracción que el fenómeno de las mareas nos hace observar a diario. Como la Tierra gira más rápidamente sobre sí misma (una vuelta cada 24 horas) que la Luna alrededor de la Tierra (en 28 días), las mareas se corren sobre la superficie de la Tierra, y este corrimiento va acompañado de una disipación de energía.

El resultado es una disminución de la velocidad de rotación de la Tierra (con el consiguiente alargamiento de la duración del día de 0,002 segundos por siglo) y un alejamiento de la Luna de unos 3,5 centímetros por año. Por tanto, hace varios millones de años, la Tierra giraba sobre sí misma más deprisa y la Luna estaba más próxima.

Este retraso no es constante, según muestran los indicadores que varían con los ciclos de las mareas oceánicas: crecimiento de los corales y de ciertos depósitos fósiles de conchas. No obstante, gracias al análisis de los depósitos sedimentarios, el geólogo australiano G. Williams se ha remontado más atrás en el tiempo de lo que hasta ahora se había conseguido, y así ha descubierto que hace 2500 millones de años la duración del día era de unas 20 horas y que la Luna se encontraba a 348.000 kilómetros de la Tierra (384.000 kilómetros en la actualidad).

Para hallar estos valores analizó los depósitos que, al ritmo de las mareas, se van acumulando sucesivamente en un estuario. Gracias al ciclo anual de las mareas se puede reconstruir la escala de tiempo suponiendo, cosa que parece razonable, que la duración del año no ha variado apreciablemente en todo el período estudiado. La Luna, pues, ya existía en la época escrutada por Williams. Otras trazas fósiles más tenues permiten pensar que la Luna ya existía en épocas todavía más remotas, del orden de 3800 millones de años. Si la Luna fue capturada, ello ocurrió en una fase muy precoz del sistema solar.





3. EN ESTA SIMULACION NUMERICA, la Luna se suprime bruscamente en la fecha de hoy ($t = 0$). Bajo la acción de las perturbaciones planetarias y en presencia de la Luna, la oblicuidad de la Tierra sufre pequeñas variaciones (1,3 grados) en torno a su valor medio (23,3 grados) (*a*). Bastan estas variaciones para inducir variaciones de casi un 20 por ciento en la insolación recibida sobre la Tierra a 65 grados de latitud norte (*b*) que, según la teoría de M. Milankovitch, originan los períodos glaciales. Sin la Luna, las variaciones de la oblicuidad y de la insolación a lo largo de un millón de años se hacen mucho mayores.

Tierra sin Luna

Si no estuviera la Luna, la velocidad de rotación de la Tierra sería más elevada, ya que no la habría frenado el efecto de marea debido al satélite. Extrapolando los valores hallados por Williams, se puede estimar una velocidad de rotación primordial de la Tierra del orden de 1,6 veces su velocidad actual, es decir, una duración del día de 15 horas. Con Frédéric Joutel y Philippe Robutel, hemos estudiado, en la Oficina de Longitudes, las variaciones posibles de la oblicuidad de la Tierra, una vez aceptada esa hipótesis. Con ese fin hemos empleado un nuevo método de análisis de la estabilidad del movimiento: el análisis de frecuencias. Para cada valor de la oblicuidad inicial de la Tierra, se obtiene una velocidad de precesión de su eje de rotación. Si el movimiento es estable, esta velocidad variará continuamente con la oblicuidad inicial.

Por el contrario, si el movimiento es caótico o inestable, la velocidad de precesión no estará definida de manera única y dependerá en alto grado de minúsculas diferencias en las condiciones iniciales. El gráfico de la velocidad de precesión en función de la oblicuidad inicial permite, pues, decidir sobre la estabilidad de la oblicuidad de la Tierra (*véase la figura 5*). Este análisis muestra la existencia de una vasta zona caótica, que va de una oblicuidad nula hasta aproximadamente 85 grados; si, con una oblicuidad inicial de la Tierra comprendida entre estos valores, no existiera la Luna, la oblicuidad de la Tierra podría experimentar muy fuertes oscilaciones y recorrer casi toda esa zona en algunos millones de años.

En la figura 5 se han representado los valores mínimos, medios y máximos que alcanza la oblicuidad de la Tierra en 18 millones de años para distintos valores de la oblicuidad inicial. A lo largo de un tiempo tan corto, la oblicuidad no recorre, en los ejemplos considerados, toda la zona caótica, pero nuestro análisis muestra que, para períodos de tiempo más largos, son posibles variaciones que abarquen la totalidad de la zona.

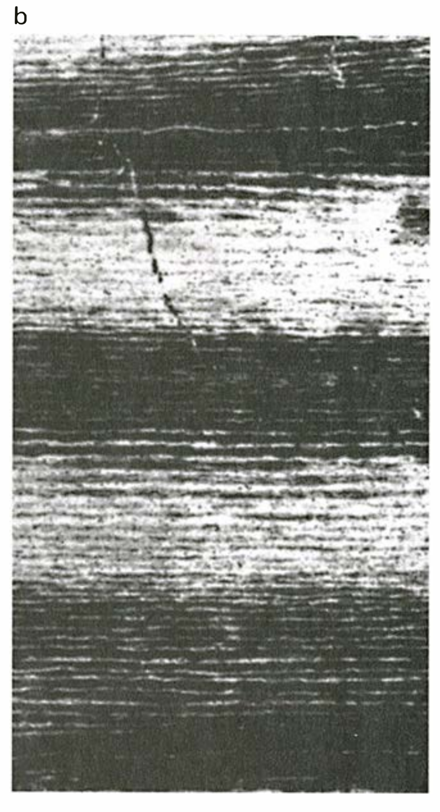
En consecuencia, sin la Luna la Tierra presentaría variaciones de oblicuidad tales que el clima en su superficie se alteraría radicalmente. Es preciso subrayar que, con una oblicuidad de 85 grados, la Tierra se encontraría recostada sobre su órbita, como lo está Urano. La casi totalidad de la Tierra experimentaría, como ahora ocurre en las zonas polares, días y noches de unos seis meses. En el polo, el Sol permanecería durante mucho tiempo muy alto en el cielo, y es altamente probable que tales condiciones de insolación llevaran consigo modificaciones importantes en la atmósfera de la Tierra. Desde luego, al suponer que la velocidad de rotación primordial de la Tierra es de 15 horas, hemos hecho la elección que nos ha parecido más verosímil, pero otras hipótesis de formación de la Luna pueden conducir a velocidades de rotación de la Tierra diferentes. Como todo esto es muy conjetural, hemos preferido estudiar también la estabilidad de la oblicuidad de la Tierra sin la Luna para cualquier valor de la rotación primordial de la Tierra. Se halla entonces que, para todo período de rotación comprendido entre 12 y 48 horas, existe una zona caótica muy grande para la oblicuidad de la Tierra, que va desde casi cero a unos 85 grados (*véase la figura 6*). Es, pues, legítimo afirmar que la Luna actúa de regulador climático para la Tierra, y que es ella la que nos garantiza, a largo plazo, una relativa estabilidad climática.

Uno puede entonces preguntarse qué es lo que sucede en otros planetas del sistema solar.

a



b



4. ESTAS CAPAS SEDIMENTARIAS AUSTRALIANAS, estudiadas por G. Williams, tienen, respectivamente, una edad de 650 millones de años (*a*) y 2500 millones de años (*b*). Los estratos de la izquierda se formaron con los sucesivos depósitos de fango oscuro y arena clara en un estuario al ritmo de las mareas; suponiendo constante la duración del año, se puede deducir la duración del día y la distancia Tierra-Luna en épocas remotas. Los estratos de la derecha evidencian también los efectos de las mareas lunares.

El comportamiento caótico de la oblicuidad de los planetas

Hemos estudiado, de la misma manera que para la Tierra, la estabilidad de la orientación axial de todos los planetas principales del sistema solar. Mercurio y Venus son especiales, pues, sin duda a causa de los efectos de marea del Sol, sus velocidades de rotación son en la actualidad muy pequeñas. Venus posee también una particularidad que intriga desde hace mucho tiempo: no gira en el mismo sentido que los otros planetas, o, en otras palabras, va cabeza abajo.

Hasta el presente, la mayor parte de los astrónomos que se habían ocupado de este problema habían llegado a la conclusión de que Venus había nacido de esta manera o, todo lo más, acostado, pues así los efectos disipativos resultantes de las interacciones núcleo-manto, o de las fuerzas de las mareas atmosféricas debidas al Sol, pudieron ponerlo cabeza abajo.

Pero nosotros hemos demostrado que, si el propio Venus hubiese empezado girando con una velocidad de rotación similar a la de la Tierra y en el mismo sentido que ésta, por la

presencia de una zona caótica muy grande habría sido posible que la oblicuidad de Venus alcanzara valores muy elevados, próximos a 90 grados. Los efectos disipativos podrían entonces haberlo llevado a su posición actual, donde acabaría por estabilizarse.

Para Mercurio la situación es un poco diferente. No conocemos el período de rotación primordial del planeta, pero basta con suponer que era inferior a 300 horas para asegurar que, en el curso de su historia, Mercurio sufrió un episodio muy fuertemente caótico, con variaciones de la oblicuidad desde 0 hasta 90 grados en algunos millones de años. Después, como la rotación del planeta siguió perdiendo velocidad a causa de los efectos de marea debidos al Sol, pudo enderezarse y acabar en su posición actual.

Marte está lejos del Sol, y como sus satélites, Fobos y Deimos, tienen masas demasiado pequeñas para retrasar su rotación, su período de rotación actual, 24 horas 37 minutos, ha de estar cerca del primordial. El ecuador de Marte está inclinado 25 grados sobre el plano de su órbita, y la velocidad de precesión del planeta, de 7,26 segundos por año, cae cerca de ciertas frecuencias del movimiento de su órbita. Además, las variaciones de la inclinación de la órbita de Marte son mucho más notables que las de la Tierra. Se deduce de ello que las variaciones de su oblicuidad a lo largo de un millón de años son mucho mayores que las de la Tierra; Ward las halló del orden de 10 grados alrededor de un valor medio de 25 grados. Estas variaciones traen consigo fuertes variaciones climáticas en la superficie, y ciertas estructuras de su relieve parecen testimoniar antiguos cambios de esa naturaleza.

De acuerdo con nuestros cálculos, el movimiento de la oblicuidad de Marte es caótico. De ello derivan dos consecuencias. En primer lugar, y a la manera de lo que acontece con el movimiento orbital de los planetas interiores, no es posible hacer predicciones del movimiento de precesión de Marte más allá de algunos millones de años.

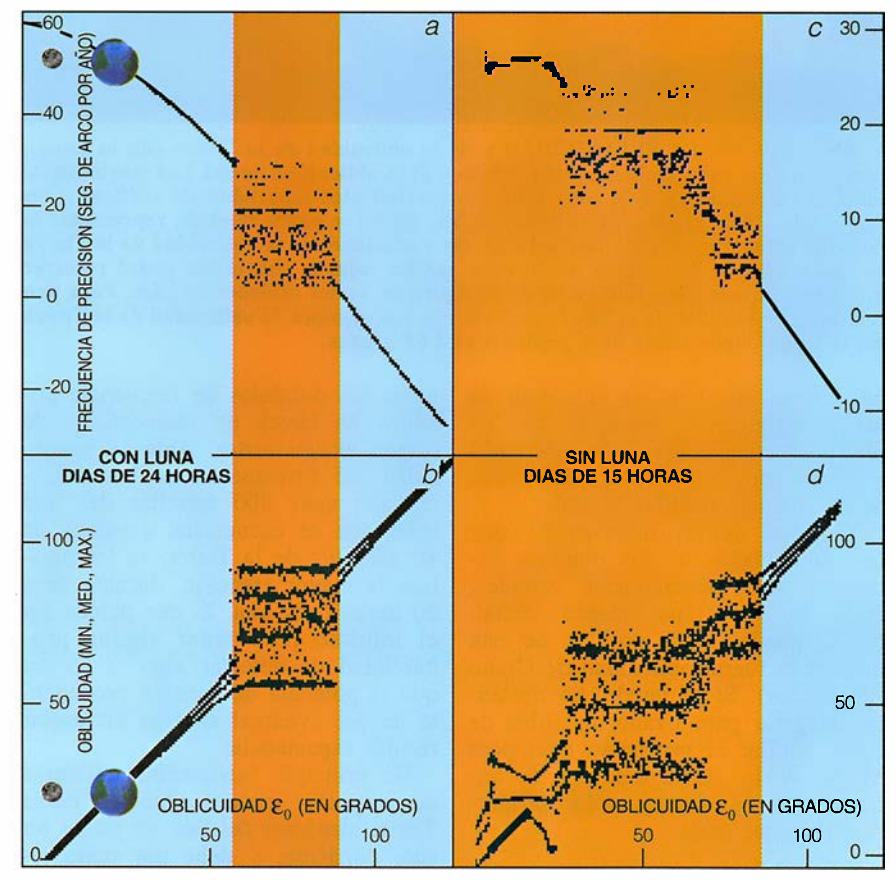
Y lo que reviste mayor importancia, la oblicuidad de Marte puede sufrir variaciones mucho mayores que las predichas por Ward; pueden ir desde 0 a 60 grados en algunos millones de años. Habrá que revisar la historia climática de Marte a la luz de estos nuevos datos. La existencia de esta gran zona caótica para la orientación del planeta tiene otra consecuencia: ya no se puede considerar que la oblicuidad de Marte sea primordial, lo que suprime una ligadura de los modelos de formación del sistema solar.

Formación del sistema solar

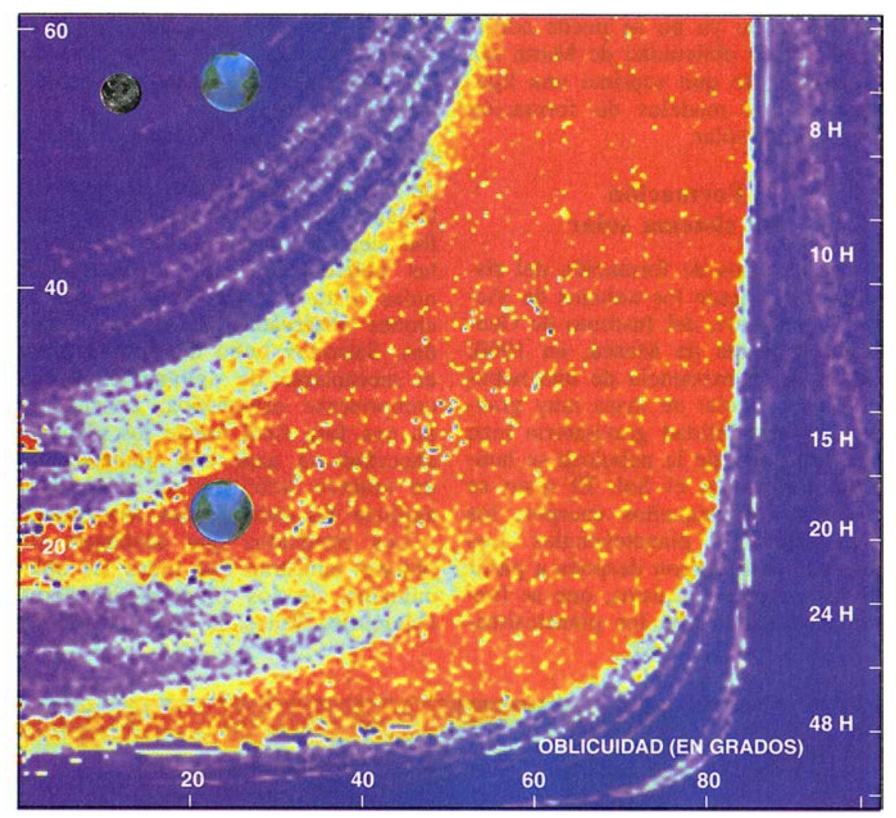
Los modelos de formación del sistema solar, desde los trabajos de Victor S. Safronov, del Instituto de Geofísica Aplicada de Moscú, en 1960, parten de la existencia de una nebulosa solar inicial de masa muy grande. La inestabilidad gravitatoria hizo que una parte de la nebulosa se hundiese y formara el Sol. El resto se condensó en pequeños cuerpos, los planetésimos o planetesimales. Los planetas se formaron después a partir de los mayores de éstos, que se fueron engrosando con los planetesimales más pequeños a medida que chocaban con ellos. Una gran parte de los planetesimales restantes fue expulsada a continuación.

Safronov había demostrado que, si la aglomeración se realizaba partiendo de muchos planetésimos de pequeño tamaño, la rotación de los planetas iba siempre en el mismo sentido y las oblicuidades eran prácticamente nulas. Para dar cuenta de las variaciones observadas en las oblicuidades, Safronov hubo de introducir en el mecanismo de aglomeración una componente estocástica, consistente en una fase final donde los planetas chocaban al azar con planetésimos un número suficiente de veces para explicar las oblicuidades observadas.

Los resultados que acabamos de obtener muestran que todas las oblicuidades de los planetas interiores (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte)



5. CADA PUNTO de estas figuras corresponde a una simulación del movimiento de la Tierra a lo largo de 18 millones de años, con Luna (*a-b*) y sin Luna (*c-d*). Los valores mínimos, medios y máximos alcanzados por la oblicuidad se representan en (*b*) y (*d*) en función de la oblicuidad inicial. Si el movimiento es estable, la frecuencia de precesión π varía continuamente en función de la oblicuidad inicial ε_0. En esta zona regular (que incluye las condiciones actuales de la Tierra), las variaciones de la oblicuidad de la Tierra son muy pequeñas, como ocurre en las zonas azules de las figuras (*a*) y (*c*). Por el contrario, en la porción roja de la figura (*a*) la zona de precesión no está definida: la oblicuidad es caótica, y puede variar de 60 a 90 grados en unos millones de años. Sin Luna, y para un período de rotación de la Tierra de 15 horas, la zona caótica (*en rojo*) se extiende desde 0 hasta cerca de 90 grados (*c*). A lo largo de 18 millones de años, la oblicuidad no recorre íntegramente esta zona (*d*), pero nada hay que le impida hacerlo en un período de tiempo más largo.



6. ANALISIS DE LA ESTABILIDAD y de la oblicuidad de la Tierra (sin la Luna), para cualquier valor de la duración del día y de la oblicuidad inicial. Los movimientos estables corresponden a la zona azul; los movimientos especialmente caóticos a las zonas roja y anarajanda. En la zona estable, donde se puede también representar la posición actual del sistema Tierra-Luna, las variaciones de la oblicuidad de la Tierra son muy débiles. Por contra, en la zona caótica roja, la oblicuidad podrá recorrer íntegramente una línea horizontal de la figura en varios millones de años. Para una celeridad de rotación de la Tierra de 20 horas, por ejemplo, la oblicuidad de la Tierra sin la Luna puede saltar de 0 grados a casi 85 grados.

pueden resultar sólo de la acción de las perturbaciones seculares de los planetas, completada, para Mercurio y Venus, por los efectos disipativos de las mareas debidas al Sol.

También hemos demostrado que las oblicuidades de los planetas exteriores son esencialmente estables, como lo es su movimiento orbital. No se puede, pues, explicar de esta manera la fuerte oblicuidad de Urano (98 grados). Sí se puede, no obstante, imaginar para Urano un orden de cosas similar al propuesto aquí para Venus, dentro de la hipótesis de Safronov de un sistema solar primordial de gran masa.

Posibilidades de vida extraterrestre

El 12 de octubre de 1992, la NASA ponía en marcha un ambicioso programa de investigación de señales procedentes de eventuales civilizaciones avanzadas, el proyecto SETI (*Search for Extra Terrestrial Intelligence*, o Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre). Se propone rastrear con radiotelescopios, a lo largo de diez años, todos los dominios de frecuencia posibles en busca de radioseñales de origen extraterrestre. Ante la inmensidad del firmamento, se han seleccionado unas 800 estrellas del tipo solar que se encuentran a menos de 80 años-luz de la Tierra; se les prestará la mayor atención, durante unas 20 horas cada una, lo que parece ser el mínimo para tener alguna probabilidad de detectar algo, a no ser que la potencia de emisión procedente de ese eventual sistema extrasolar resulte espectacular.

Un principio fundamental cimienta tal proyecto: nuestra situación en la Tierra, alrededor del Sol, no puede ser sino corriente, y debe por tanto repetirse múltiples veces en nuestra galaxia bajo múltiples formas. Lo malo es que somos incapaces de cuantificar la probabilidad de que haya vida organizada en un planeta alrededor de otra estrella de la galaxia.

Por no hablar de la aparición de la propia vida ni de las condiciones que puedan conducir al desarrollo de una civilización susceptible de desear comunicarse con emisiones de radio, no tenemos, hasta ahora, idea alguna de la probabilidad de que una estrella de tipo solar posea un cortejo planetario. Pese a los frecuentes anuncios de descubrimiento de planetas extrasolares, no se ha mostrado todavía de manera directa ningún objeto de esta clase, y sólo son convincentes las observaciones de discos (tal vez) protoplanetarios del tipo beta-pictoris.

Casi todas las estimaciones de la probabilidad de vida extraterrestre parecen, sin embargo, coincidir en un punto: sea cual sea el sistema planetario, sólo un planeta que no se encuentre ni demasiado lejos ni demasiado cerca de su sol permitirá el desarrollo de vida organizada tal como nosotros la conocemos en la Tierra. En efecto, las simulaciones realizadas por Michael Hart en 1978 mostraron que, fuera de una estrecha "zona de habitabilidad", se podría producir una aceleración del efecto de invernadero que conduciría a una situación del estilo de la de Venus o a una desaparición casi total de la atmósfera, como ocurre en Marte.

Nuestros cálculos ponen de manifiesto que las cosas suceden de manera enteramente distinta y que la evolución de la vida en la superficie de la Tierra está sin duda íntimamente ligada a un suceso que en los modelos de formación de los sistemas solares es poco probable: que uno de los planetas que se encuentren en la zona de habitabilidad llegue a estabilizar suficientemente sus variaciones de insolación a largo plazo gracias a un satélite de gran masa del tipo de la Luna.

Ciertamente, se podrán encontrar otras situaciones particulares que conduzcan a una estabilidad climática para el planeta considerado, pero es importante que quede claro que ello no es en manera alguna corriente. La probabilidad de que exista un planeta de estabilidad climática comparable a la del nuestro en un sistema planetario debe indudablemente revisarse a la baja en varios órdenes de magnitud, y será preciso hacer lo mismo con la probabilidad de éxito de este proyecto de la NASA.

Preguntas pendientes

Haciendo uso del movimiento orbital de los planetas del sistema solar, hemos demostrado que la Tierra debe su estabilidad climática a la presencia de la Luna. Por lo demás, es preciso subrayar que, si nuestra existencia está íntimamente ligada a la existencia de la Luna, es posible aceptar para la formación de la Luna una hipótesis poco probable, que debería rechazarse si impusiéramos la

condición de que la nuestra sea una situación corriente. Los modelos de formación de la Luna deben, por tanto, reevaluarse en consecuencia.

Por otra parte, el movimiento orbital de los planetas es en sí mismo caótico. No parece que esto implique, para la Tierra, cambios importantes en sus parámetros orbitales, pero en otro sistema planetario las cosas podrían suceder de manera distinta y las inestabilidades orbitales por sí solas podrían dar lugar a fuertes variaciones climáticas, incompatibles con la emergencia de vida organizada, o incluso a que el único planeta que inicialmente se encontraba en la zona de habitabilidad abandone ésta. Sólo un conocimiento más profundo de la dinámica global de los sistemas planetarios permitirá responder, al menos parcialmente, a tales preguntas.

Todavía estamos lejos de conocer los mecanismos de formación de los sistemas planetarios. Una de las dificultades importantes en la resolución de este problema reside en el hecho de que sólo disponemos de un ejemplo de sistema planetario, el nuestro. El descubrimiento de otro sistema planetario sería un elemento esencial para la comprensión de la historia de nuestro propio sistema solar, aun cuando no hubiera vida en el otro sistema.

Finalmente, la respuesta climática en la superficie de un planeta bajo el efecto de cambios importantes de su órbita o de su orientación axial se conoce mal todavía, y es deseable que el desarrollo del conocimiento de la dinámica de las atmósferas planetarias permita poder simular en ordenador los efectos de estos cambios.

Estos problemas, que competen a campos de la astronomía muy distintos, constituyen un vasto programa de investigación. Los esfuerzos constantes para resolverlos nos aportarán elementos valiosos para conocer el origen del sistema solar y la aparición de la vida sobre la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LA STABILITÉ DU SYSTÈME SOLAIRE. J. Laskar, en *Chaos et déterminisme*, dirigido por A. Dahan et al., Point Seuil 1992.

THE CHAOTIC OBLIQUITY OF THE PLANETS. J. Laskar y P. Robutel en *Nature*, volumen 361, páginas 608-612, 18 de febrero de 1993.

STABILIZATION OF THE EARTH'S OBLIQUITY BY THE MOON. J. Laskar, F. Joutel y P. Robutel en *Nature*, vol. 361, págs. 615-617, 18 de febrero de 1993.

Ciencia y empresa

Eliminación de contaminantes

Mediante fluidos supercríticos

Uno de los problemas principales a los que debe hacer frente el progreso de la sociedad es el relativo a la eliminación de residuos y contaminantes. La Tierra se contamina en zonas de tratamiento de madera, en vertederos de residuos peligrosos, alrededor de ciertas plantas químicas y en lugares donde se ha producido un vertido accidental. El nivel de concentración de los contaminantes habituales, los hidrocarburos clorados por ejemplo, es de 1 a 100 partes por millón (ppm).

Los tipos de contaminantes varían tanto como las propiedades fisicoquímicas del suelo. Su tratamiento ideal requerirá, pues, diseñar un proceso que pueda acomodarse a un amplio intervalo de condiciones. Los fluidos supercríticos (FSC) pueden ser una solución. Una sustancia se encuentra en estado supercrítico cuando la presión y temperatura son superiores a su presión y temperatura críticas.

El interés por los FSC surgió a raíz de los estudios realizados por J. B. Hannay y J. Hogarth en 1879, aunque la primera aplicación industrial no apareció hasta 1943 con el desasfaltado de crudos petrolíferos. Debido a las características que presentan, se aplican preferentemente en la industria alimentaria y petroquímica. Pero también el sector ambiental puede resultar beneficiado.

Los FSC, así el etileno y el propano entre otros, se caracterizan por tener unas propiedades fisicoquímicas intermedias entre los líquidos y los gases. Presentan alta densidad, lo que les confiere unas propiedades disolventes análogas a las de los líquidos. En la proximidad del punto crítico, el fluido es altamente compresible, es decir, se producen grandes cambios de densidad con pequeños cambios en la temperatura y la presión. (Punto crítico es aquel por encima del cual ningún valor de la presión es lo bastante grande para producir licuación.)

Teniendo en cuenta que la solubilidad guarda una estrecha relación con la densidad, pequeñas variaciones de estas propiedades intensivas originan amplias variaciones en su comportamiento. Por otro lado los FSC presentan unas propiedades de transporte, viscosidad y difusividad similares a las de los gases, lo que supone un aumento de la velocidad de transferencia de materia. Tienen una tensión superficial muy baja que les permite una fácil penetración en los materiales microporosos.

Las sustancias que se emplean como disolventes supercríticos poseen propiedades críticas fácilmente accesibles. Además de los mencionados etileno y propano, se emplea sobre todo dióxido de carbono. El motivo de recurrir al CO_2 obedece a su pequeña entalpía de vaporización, fácil disponibilidad, bajo coste, carácter inocuo y no inflamable y ser un buen disolvente de muchos productos orgánicos.

Podemos aumentar la solubilidad de algunas sustancias en los FSC mediante la adición, en pequeñas proporciones, de modificadores o cosolventes. Un modificador es una sustancia subcrítica que se añade en cantidades relativamente pequeñas y cuya volatilidad es intermedia entre la del disolvente y la del componente (o componentes) que se va a extraer, presentando una buena solubilidad (o ser completamente miscible) en el disolvente. El mayor aumento en la solubilidad ocurre cuando hay una interacción específica entre el modificador y el soluto, tal como puentes de hidrógeno o interacciones dipolo-dipolo.

Los fluidos supercríticos se aplican, en el sector medioambiental, a la eliminación de residuos tóxicos y peligrosos y a la regeneración de adsorbentes agotados. La extracción supercrítica puede llevarse a cabo de dos formas: en un proceso de una sola etapa y en un proceso de separación en dos etapas.

En el método de una etapa, los contaminantes entran en contacto directo con el fluido supercrítico; los residuos se transfieren desde el sustrato hacia el fluido. Se saca partido aquí de la capacidad de solvatación de los FSC por los compuestos orgánicos pesados que se encuentran en

Diagrama de un proceso de extracción supercrítica para el tratamiento de líquidos en continuo. El dióxido de carbono supercrítico pasa a través de la columna de extracción y disuelve las sustancias que se van a extraer. Mediante una válvula de regulación de la presión, el dióxido de carbono se evapora en el separador y los solutos extraídos precipitan. Finalmente, el dióxido de carbono se licúa y se introduce de nuevo en la columna de extracción

unos niveles de concentración de unos pocos cientos de ppm. Además, el FSC, disolvente inerte, elimina el residuo del sustrato. A la salida del extractor, los contaminantes pueden separarse fácilmente de la fase fluida por ligeros cambios en las condiciones de operación (presión, temperatura o ambas). El FSC purificado puede pasar de nuevo a la circulación. El método de contacto directo resulta idóneo para el tratamiento de sólidos y líquidos con una alta concentración de contaminantes, por ejemplo, suelos y fangos.

Para la limpieza de terrenos contaminados suele tomarse el camino del enterramiento y la incineración de la tierra. Pese a ser una técnica sencilla y barata, el enterramiento no se considera, desde una óptica ecológica, una solución permanente. Por su parte, la incineración comporta un elevado consumo energético, con los consiguientes costes de operación.

Los lodos y fangos se encuentran frecuentemente en vertederos abandonados, lagunas y desagües de plantas industriales. Contienen, por lo común, un 20 % de sólidos (con una concentración de metales relativamente alta) y por encima del 2 % de materiales orgánicos tóxicos.

El método usual para el tratamiento de fangos es el de solidificación en bloques para su posterior enterramiento. El inconveniente mayor es que el proceso de fijación está inhibido por la presencia de compuestos orgánicos (alcoholes, aldehídos, cetonas, hidrocarburos clorados, ácidos orgánicos y fenoles); en consecuencia, la durabilidad de los sólidos fijados es limitada. Pero esa dificultad puede remontarse utilizando un fluido supercrítico como agente extractante de la materia orgánica antes de la fijación. Al ser el tratamiento de fangos un sistema líquido-fluido, el tipo más eficaz de operación es probablemente la extracción en contracorriente.

En lo que respecta a los procesos de separación en dos etapas, las aplicaciones principales se basan en el tratamiento de aguas residuales (lixiviados y aguas madres), que emplean, cada vez más, carbón activo o resinas sintéticas como adsorbentes para la purificación de corrientes industriales de desecho. En estos sistemas, el disolvente sirve para regenerar los lechos de adsorbente saturados de contaminantes. Los métodos tradicionales, así la regeneración térmica, adolecen de varios inconvenientes: pérdida de capacidad de carga del adsorbente, extrema degradación y alto consumo energético.

Para evitar el transporte en bloque del material contaminado desde el lugar de los residuos hasta la planta de tratamiento, se han diseñado unidades móviles de separación de residuos del suelo, eliminación de compuestos orgánicos de fangos y regeneración de carbón activo. Algunas unidades han pasado ya a la fase de ensayo.

Dentro de las diversas aplicaciones de los FSC en el ámbito del tratamiento de residuos adquiere interés la oxidación húmeda. A lo largo de dicho proceso, los residuos orgánicos se destruyen, por reacción química, en un medio acuoso supercrítico. No es necesario concentrar los contaminantes previamente por contacto con un adsorbente. La corriente residual se calienta, se comprime por encima del punto crítico del agua (a 374 grados y 218 atmósferas) y se mezcla con el oxidante.

Los residuos orgánicos se convierten entonces en productos inocuos, principalmente CO_2 y agua. Alrededor del punto crítico del agua, la densidad del medio es suficientemente baja y la temperatura suficientemente alta como para que los puentes de hidrógeno se hallen muy debilitados. En esas condiciones, el agua evidencia una gran capacidad para disolver los compuestos orgánicos. La constante dieléctrica cae drásticamente y se separan sin dificultad las sales inorgánicas. El aire y el oxígeno son completamente miscibles con el agua supercrítica; por consiguiente, la mezcla de reacción es una fase homogénea y no requiere ningún dispositivo mecánico de mezclado.

I. MEDINA, J. J. SUÁREZ,
J. L. BUENO y J. L. MARTÍNEZ,
Departamento de ingeniería química
de la Universidad de Oviedo

Geopolímeros

Nuevos materiales cementantes

Los avances registrados en el desarrollo de materiales cementantes de elevada resistencia o altas prestaciones obedecen a las innovaciones introducidas en los procesos, composición, empleo de nuevas materias primas y otros.

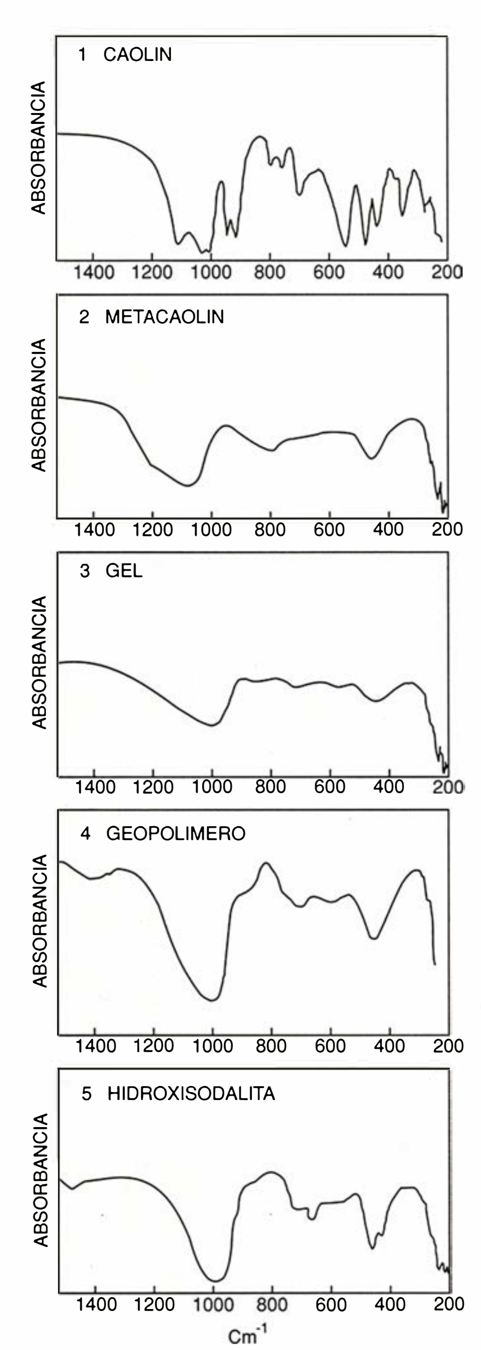
Llámase cementante a todo aquel material capaz de endurecer y desarrollar en el tiempo resistencias mecánicas, cohesionando simultáneamente con otros materiales. Los materiales cementantes tradicionales se basaban fundamentalmente en la cal. Los romanos eran perfectos conocedores de las técnicas de trabajo con dicho conglomerante. Entre las nuevas familias de materiales cementantes destacan los cementos libres de macrodefectos (MDF, "macro defects free cements") y los sistemas densificados (DSP, "densified systems"). Y, sobre todo, las cerámicas consolidadas por reacciones químicas; a éstas pertenecen los cementos dentales, los cementos basados en fosfatos y los geopolímeros.

Antes de determinar los procesos de deformación de los nuevos materiales cementantes, conviene echar un vistazo hacia atrás para conocer la situación original. Partíamos de los cementos inorgánicos (portland) y de las cerámicas tradicionales. Para la fabricación de las cerámicas se seguían tres pasos: selección de materias primas, proceso de humectación y, por último, fabricación y cocción de la cerámica. La obtención de cementos inorgánicos implica un cambio en el orden de esos tres pasos: selección de materias primas, cocción y procesado del clinker y, por fin, proceso de hidratación. (Denomínase clinker el material cerámico granulado y duro que sale por la boca de los hornos de cemento.)

En la etapa preliminar común, de selección de las materias primas, se atiende, entre otros parámetros, a la composición química y mineralógica, y a la granulometría (tamaño y forma) de las partículas. Por lo que a las cerámicas tradicionales concierne, el procesado se realiza a través de métodos de vía húmeda diversos. Su tercera fase, de secado y cocción, tiene por finalidad densificar el material, lo que se consigue mediante la reconstitución de la mineralogía y la microestructura de las fases. No hay que olvidar que el proceso térmico de cocción de los materiales conlleva un reordenamiento microestructural de éstos que responde a los distintos estados energéticos que atraviesan.

En los cementos inorgánicos, el proceso de cocción precede al de fabricación de elementos o a la puesta en obra del material que pasa por la etapa intermedia de clinker. El clinker necesita de molienda y de mezcla con un regulador de fraguado antes de someterlo a los procesos de hidratación y curado que propician la obtención de objetos resistentes.

La inversión en el orden de las etapas de fabricación de cementos inorgánicos y cerámicas tradicionales lleva consigo un efecto importante en la microestructura de unos y otras. Así, en los cementos predomina el enlace de hidrógeno, en tanto que en las cerámicas dominan los enlaces esta-



Espectros infrarrojos de cada una de las fases de obtención de un geopolímero. La fase gel no genera bandas debidas al aluminio en el intervalo de 500 a 900 cm^{-1}, al contrario que el geopolímero y la hidroxisodalita cristalina, sí activos en ese intervalo. Por otro lado, el geopolímero exhibe bandas en el intervalo en 850 y 700 cm^{-1} muy diferentes de las mostradas por la hidroxisodalita a 655 y 435

blecidos a través de óxidos metálicos, carburos o nitruros.

Hay, por fin, procesos híbridos en los que, siguiendo las vías de producción de los cementos, se fabrican elementos cerámicos. Sirva de ejemplo el empleado para la obtención de materiales refractarios a partir de cemento aluminoso. El clinker del cemento aluminoso se muele y se hidrata; pero al mezclarlo con agua se incluyen, a modo de áridos, sustancias refractarias (corindón, por ejemplo). La mezcla plástica resultante se enmolda, se deja fraguar y secar, y luego se somete a cocción.

La matriz de cemento aluminoso desarrolla al principio hidratos cristalinos que conservan el agua estructural durante las fases iniciales de la cocción. A medida que aumenta la temperatura, entre 275 y 340 grados C, se descomponen la gibsita ($Al(OH)_3$) y el hidrogranate ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O$), con lo que el material pierde resistencia mecánica. Sin embargo, a temperaturas aún mayores, del orden de 500 a 600 grados centígrados, los enlaces típicos del cemento se sustituyen gradualmente por enlaces característicos de las cerámicas, aumentando de nuevo la resistencia.

Los procesos de fabricación de cementos y cerámicas tradicionales no admiten muchas variaciones. Por ello, la investigación se ha aplicado a la búsqueda de métodos más eficaces y flexibles, así como de nuevos materiales. Fruto de ese trabajo ha sido la obtención de sistemas cuyas prestaciones decuplican las ofrecidas por los ya existentes.

Entre las características de los geopolímeros sobresale su dureza, que genera grandes resistencias mecánicas, pero son importantes también su durabilidad y la posibilidad de elaborarse utilizando materias primas baratas y muy asequibles. La mezcla que resulta durante el proceso de su fabricación, al principio plástica, endurece en pocas horas a temperaturas de 50 a 80 °C.

La síntesis de un geopolímero se lleva a cabo tras convertir en metacaolín un caolín cocido a 700 °C y expuesto a reacción en medio básico con silicato sódico. El metacaolín es un sílico-aluminato anhidro derivado de la deshidroxilación del caolín; desde el punto de vista microestructural, está constituido por una serie de láminas eléctricamente neutras unidas entre sí por fuerzas de Van der Walls. El metacaolín no se rehidrata en contacto con el agua, pero es metaestable y reacciona con los compuestos alcalinos.

Formando parte de la estructura laminar, y fuertemente ligados, hay iones hidroxilo, cuya liberación sólo es posible a temperaturas del orden de 400 a 450 °C. Durante la deshidroxilación se mantiene la configuración laminar inicial, lo cual no excluye un reajuste atómico considerable. El metacaolín se transforma en metacaolín, que posee una estructura atómica desordenada aunque no tanto como la de un vidrio o un gel de similar composición.

Joseph Davidovits describió la activación del metacaolín por sales alcalinas (NaOH, KOH, etc.) según un modelo polimérico y caracterizó la reacción generadora de un material resistente por su capacidad de desarrollar polímeros con la fórmula $Mn[(SiO_2)_zAlO]wH_2O$, siendo n el grado de polimerización, M un ion monovalente (sodio, potasio) y z un dígito del uno al tres. Esquemas similares se han propuesto para explicar la formación de muchas zeolitas: productos caracterizados por comenzar su desarrollo con dimensiones coloidales, aunque luego coalescen y cristalizan. Los geopolímeros, por el contrario, son productos amorfos, y esta cualidad es precisamente la que dificulta en sumo grado su estudio.

La espectroscopía de absorción infrarroja permite, sin embargo, estudiar los cambios experimentados durante las distintas etapas que parecen sucederse en la formación de un geopolímero: caolín, metacaolín, fase gel previa a la formación del geopolímero e hidroxisodalita (fase cristalina).

ANGEL PALOMO SÁNCHEZ
Instituto de Ciencias
de la Construcción "Eduardo
Torroja", CSIC. Madrid.

Microbiología

¿Qué son los bioprospectores?

Paseando por una calle costarricense, tropieza uno con un perro enfermo. De sus ojos hinchados gotea un líquido. ¿Lo esquivamos o recogemos el fluido? Lo último, si el interesado es un bioprospector. El microbio *Acremonium kiliense*, depositado en una agencia federal estadounidense para solicitud de patente, se obtuvo así.

Desde que la penicilina se apuntó el éxito comercial en las postrimerías de la segunda guerra mundial, los laboratorios farmacéuticos han venido registrando hasta los rincones más escondidos de la Tierra en busca de microorganismos que fabriquen productos químicos médicamente activos. Ciertos microbios del suelo español alojaban un agente anticolesterol del que se compone el mevacor, producto de explosivo éxito financiero. Otros de Argentina, Venezuela y lugares muy dispares han conducido a las estreptomicinas y cloromicetinas.

Para los bioprospectores, los mi-

crobios tienen una ventaja sobre las plantas: su tamaño. Un puñado de tierra o un frasco de aguas residuales alojan miles de organismos que se pueden cultivar en el laboratorio. Además, esos seres unicelulares, de inmensa diversidad en los trópicos, han atraído menos la atención de los políticos. A casi nadie le importaba si dentro de sus fronteras uno cortaba el pelo de un puerco espín o recogía excrementos de cebra.

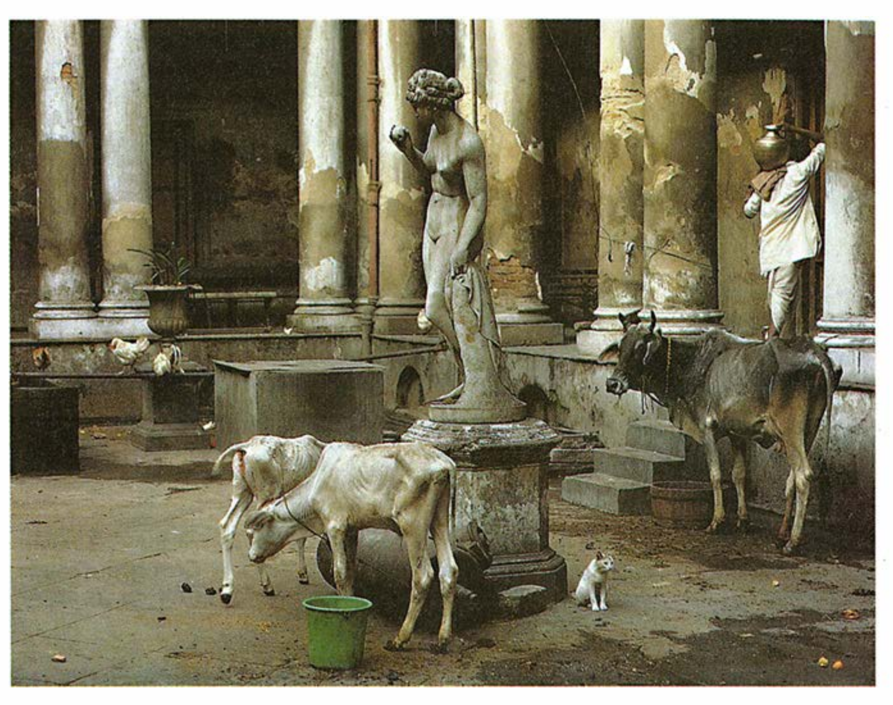
Pero las cosas han cambiado a raíz de la Convención sobre Biodiversidad. Aunque los microbios florezcan en los países tropicales, Pat Roy Mooney, de la Fundación Internacional para el Progreso Rural de Ottawa, estima que el 86 por ciento de las estirpes de cultivos microbianos proceden del mundo industrializado. El Registro Americano Tipificado de Cultivos (ATCC) comprende más de 3000 bacterias y hongos recogidos en Panamá, Etiopía, la India y otros países. Cuando la Convención entró en vigor en diciembre de 1993, esos microorganismos se convirtieron en exclusiva propiedad del depositante.

Las naciones del hemisferio sur son conscientes de que nunca se dieron cuenta cabal del valor de lo que regalaban. No sólo con los microbios. El 68 por ciento de las semillas que hay en los bancos de genes del hemisferio norte procedentes del Tercer Mundo —así como las plantas que dan una cuarta parte de los fármacos de uso médico mundial— pertenecen ahora a países industrializados.

Tradicionalmente, los recursos biológicos se han considerado "herencia común de la humanidad". Lo que se traducía, en la práctica, en el uso libre de tales bienes por parte de los países industrializados para después venderlos, comercializados, al Tercer Mundo. Añádase hoy que la biotecnología es una ciencia estratégica para el siglo venidero, en la que los explotadores de antaño van en cabeza.

La Convención sobre Biodiversidad, mientras establece que los recursos son propiedad soberana de una nación —al mismo nivel que el carbón o el petróleo—, demanda también que sean accesibles a los prospectores. Pero las normas para tal acceso tardarán algún tiempo en redactarse.

Walter W. Reid, del Instituto de Recursos Mundiales de Washington, calcula que, si se pagaran regalías por valor de un 3 por ciento (cifra típica para muestras de actividad desconocida) y si uno supone que una especie química tiene una probabilidad de uno en 40.000 de convertirse en un fármaco por valor de 10 millones de dólares, una muestra de tierra con 100 nuevas especies químicas podría rendir 500 dólares al país de origen. Ninguna empresa, sin embargo, está dispuesta a pagar tales cantidades por las buenas.



Un patio en Calcuta: ¿Cuántas patentes puede Vd. reconocer en esta imagen?

El campo de los microbios se halla, al menos, bastante libre de las cuestiones de propiedad intelectual que infestan el trabajo sobre plantas y semillas procedentes de cultivos nativos. Las compañías que hallan un microorganismo útil y desarrollan un producto comercializable —proceso que suele costar millones de dólares y durar más de un decenio— pueden atribuirse el crédito por el descubrimiento. Algunas veces, no obstante, debe compartirse el crédito. Una cepa de hongos que usaban los agricultores brasileños para matar una variedad de hormigas que causan pérdidas de cientos de millones de dólares en las cosechas de los EE.UU. fue patentada por un científico de la Universidad de Florida.

Mientras se debate cuánto debe abonarse a un país subdesarrollado por sus materias primas, los laboratorios farmacéuticos han puesto el ahínco en cribar el suelo de sus alrededores hasta obtener los mismos microbios. Los prospectores que sueñan con aventuras en la jungla pueden quedar desilusionados. Pero hay trabajo para todos. Y convendría aprestarse a investigar los enormes recursos microbianos que se encierran en los bosques tropicales antes de que la tala o la quema acabe con ellos.

MADHUSREE MUKERJEE

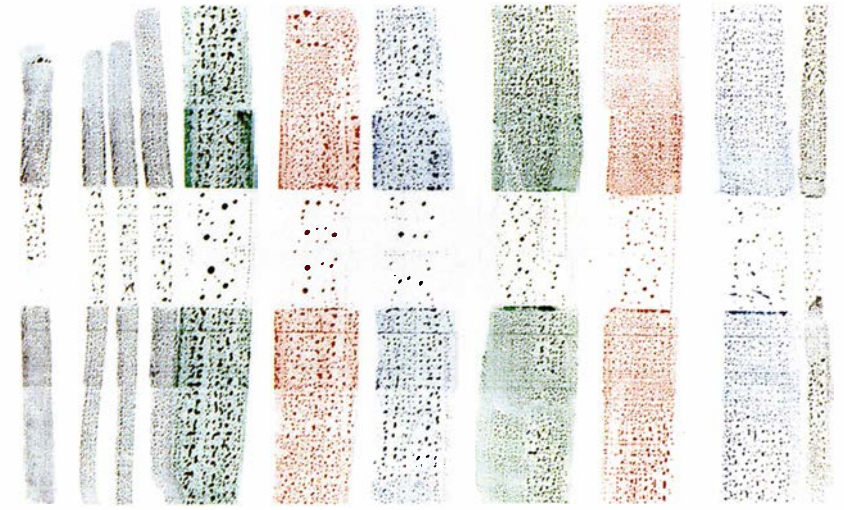
Química básica

Su aplicación

Cuando los químicos de polímeros desean elaborar un material sobre el cual nada quede pegado, construyen una molécula en la que un átomo de flúor toma el lugar ocupado por otro de hidrógeno en los ubicuos hidrocarburos. El flúor forma un fuerte enlace covalente con el carbono, impidiéndole combinarse con átomos de otras moléculas.

El ejemplo habitual que se cita a propósito de tales inventos antiadherentes es, sin duda, el politetrafluoroetileno, o teflón. Dow Chemical acaba de obtener una nueva formulación de fluorocarburo cuyas propiedades abhesivas (opuestas a propiedades adhesivas) pueden superar las del teflón y aplicarse donde no sirve su primo de la sartén. Este producto fluoroquímico podría crear una superficie protectora contra los percebes en los barcos, la suciedad en las paredes empapeladas y el engelamiento en los aviones.

Sometido a 100 grados Celsius durante una hora, el recubrimiento de Dow forma un acabado duro y limpio. El teflón debe calentarse sobre el metal a temperaturas con frecuencia superiores a los 250 grados Celsius. Una vez enfriada, la dureza del acabado del polímero se parece a la de la laca de un automóvil. Menos poroso que el teflón, el fluorocarburo impide que los contaminantes queden atrapados bajo la superficie. También



*Esta prueba de adherencia muestra cómo la tinta de un marcador con punta de fieltro forma gotículas sobre el polímero fluorado de Dow Chemical (*banda horizontal*); la tinción permanece sobre el substrato de teflón en la parte superior y en la inferior*

impide que la superficie se empape con los disolventes habituales de pinturas, tintes o tintas, cualidad aprovechable en la guerra contra las "pintadas". Un marcador con punta de fieltro deja gotículas de tinta que se adhieren mal a una superficie tratada con el producto de Dow, pero permanecen fijas sobre el teflón.

La creación de Dow, que todavía tiene que recibir un nombre comercial, se fabrica elaborando un polímero que contiene moléculas de fluorocarburo y de hidrocarburo. Los fluorocarburos de esas largas cadenas de polímeros presentan una resaltada aversión por el agua. Tienden a flotar en la superficie de una solución acuosa, como si fueran diminutas boyas moleculares. Las moléculas de hidrocarburo que quedan sumergidas en la parte baja de una cadena portan iones que se enlazan con la superficie inferior. El resultado es una combinación perfecta: la cara abhesiva arriba, la adhesiva abajo. Estos grupos iónicos se enlazan también con otro polímero, una oxazolina que junta cada cadena de boyas y ayuda a ligarlas a una superficie. Tal sistema de enlace cruzado fija las cadenas rígidamente en su lugar.

Donald W. Smith, químico de polímeros de Dow, elaboró el producto hace siete años. La empresa dejará en manos de otros su comercialización. "No somos una compañía de recubrimientos", dice Benjamin M. De-Koven. colaborador del proyecto. Dow ha firmado una licencia no exclusiva con 3M, compañía del sector que está también trabajando para conseguir que el producto se endurezca a la temperatura ambiente, de modo que pueda venderse como un acabado autosecante ordinario, lo mismo que las pinturas.

GARY STIX

Incendios forestales

Prevención meteorológica

Los incendios forestales constituyen la principal amenaza para la conservación de la cubierta vegetal de España. Como culpable principal de los mismos aparece el hombre: en los últimos diez años sólo un 4 % de los incendios ocurridos en nuestro país han tenido por causa directa los rayos en tormentas secas u otros factores naturales.

El número de incendios ha ido aumentando en nuestra década, si exceptuamos el último año. Se produjeron 12.500 en 1990, 13.000 en 1991, 16.000 en 1992 y 14.700 en 1993. Por contra, la superficie afectada ha disminuido paulatinamente, pasando de más de 200.000 hectáreas quemadas en 1990 a 93.000 en 1993; esa tendencia se atribuye a las mejoras introducidas en los medios de lucha contra el fuego y a un mayor conocimiento de las causas que inciden en el origen, desarrollo y propagación de los incendios forestales.

El Instituto para la Conservación de la Naturaleza ha subvencionado el proyecto "Situaciones sinópticas típicas en incendios forestales", que, realizado en el departamento de ciencias de la atmósfera de la facultad de ciencias físicas de la Universidad Complutense de Madrid, tiene por objeto determinar en qué condiciones meteorológicas a escala sinóptica se producen el mayor número de incendios en una determinada zona de nuestro país y qué factores a menor escala influyen en el desarrollo y propagación de un incendio forestal en regiones con orografía compleja. Se trata de caracterizar, desde un planteamiento meteorológico, las situaciones de máximo riesgo del fuego para su prevención (escala sinóptica) y extinción (meso-microescala).

Para realizar el estudio desde el punto de vista sinóptico (fenómenos de duración temporal de días y, espacial, del orden de cientos de miles de kilómetros), se seleccionó un área con una alta frecuencia de incendios forestales. Abarcaba las provincias de Salamanca, Cáceres, Avila y Toledo. Nos centramos en episodios que, por su extensión espacial y temporal, resultaban significativos. Definimos con ese fin un parámetro de extensión-duración de 10^5 hectáreas por hora. Se trabajó sobre los que superaban esa unidad umbral. Al analizar las situaciones meteorológicas presentes se concluyó que existían dos que aparecían en el 99 % de estos incendios.

Denominaremos Tipo I la primera situación meteorológica. Corresponde a una baja térmica a nivel de superficie en el centro de la Península, es decir, una zona de baja presión originada por el intenso calentamiento solar sobre el suelo. Esta baja se encuentra inmersa en un anticiclón de gran espesor que se extiende incluso hasta unos 5500 m de altitud. La temperatura a 1000 m sobre el suelo oscila entre los 16 y 24 grados centígrados. Esta situación se daba el 66 % de los días en los que se desarrollaron importantes incendios forestales durante los meses de verano en el área bajo estudio. De acuerdo con trabajos anteriores del equipo de uno de los autores (Hernández), la frecuencia de aparición de la situación I en esta época del año es de sólo un 22 %, por lo que la relación casual queda descartada.

La segunda situación meteorológica, la de Tipo II, se dio en el 33 % de los incendios que superaron el umbral marcado para el parámetro de extensión duración. Corresponde a una borrasca en superficie situada al noroeste de la península Ibérica, con un frente frío asociado que penetra por el oeste. En la topografía de 5500 metros de altitud se observa al oeste peninsular una vaguada muy profunda. La temperatura a 1000 m sobre el suelo no experimenta variación con respecto al caso anterior.

¿Por qué estas situaciones, análogas a las detectadas en Canadá, Aus-

tralia y Estados Unidos, favorecen el desarrollo y propagación de los incendios forestales? Para contestar a esta cuestión, era necesario conocer la estructura térmica y dinámica de la atmósfera, durante esos días, en los primeros mil metros sobre el suelo. Con ese objetivo, realizamos durante el verano de los años 1991 y 1992, en las estribaciones de la Sierra de Gredos (zona con un tradicional alto índice de incendios), diversas campañas de experimentación en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología. Se trató, fundamentalmente, de sondeos aerológicos con globo cautivo capaces de determinar las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa del aire, presión y velocidad y dirección del viento desde el suelo hasta el techo del sondeo (aproximadamente 1000 m); ese trabajo se completaba con la instalación de estaciones meteorológicas portátiles que determinaban de modo continuo estas variables en superficie.



La disminución del número de hectáreas quemadas en los últimos años obedece a una mejor dotación de medios de extinción y a un mayor conocimiento de las causas que inciden en el origen, desarrollo y propagación del fuego

Llegamos así a la conclusión de que, en ambas situaciones meteorológicas, se desarrollan junto al suelo, aunque por motivos distintos, fuertes corrientes verticales ascendentes (corrientes convectivas) que actúan como una auténtica chimenea y favorecen el fuego. La situación de Tipo I va acompañada de una gran insolación y humedades relativas muy bajas; la sequedad del combustible hace que éste se encuentre en un estado óptimo para su ignición. La situación de Tipo II va precedida, además, de fuertes vientos que producirán un combustible aún más idóneo y contribuirán a la propagación del incendio.

Tales situaciones de riesgo pueden predecirse con un alto grado de fiabilidad y una antelación de 48 a 72 horas.

Pero la meteorología no limita su interés a su capacidad preventiva. Resulta imprescindible en las labores de extinción del fuego el conocer hacia dónde y a qué velocidad va a propagarse. Cualquier modelo informático que quiera simular con verosimilitud la propagación de un incendio deberá considerar, con la mayor exactitud posible, la influencia del factor viento. Lo que nos aboca a uno de los mayores problemas de la meteorología dinámica actual. ¿Cómo predecir el comportamiento del viento en una región con abrupta orografía?

Existen dos métodos principales de simulación de los fenómenos atmosféricos: modelos físicos y modelos matemáticos. Con la primera técnica se elabora una réplica a escala de las características de la superficie en la que se quiere estudiar el viento, por ejemplo, topografía, edificios, etcétera. Las maquetas, introducidas en túneles de viento, se les somete, mediante técnicas de laboratorio, a las condiciones que representen las situaciones atmosféricas reales. Por su lado, los modelos matemáticos utilizan técnicas basadas en el álgebra y el cálculo para resolver directamente las ecuaciones que rigen el comportamiento atmosférico. Algunas de estas ecuaciones admiten una resolución exacta, mientras que en otras hay que contentarse con técnicas aproximadas de solución a través de modelos numéricos.

En el departamento de Hernández se ha puesto a punto un modelo numérico capaz de diagnosticar el campo de viento en la superficie de una región con orografía compleja. Este modelo, desarrollado por Fosberg, se basa en la ecuación de continuidad, que establece matemáticamente que en la atmósfera no pueden producirse ni vacíos ni acumulaciones de materia. Tiene en cuenta, además, importantes fenómenos meteorológicos relacionados con el comportamiento de la atmósfera en las proximidades de una montaña.

A partir de datos topográficos (altitud de la zona) y datos meteorológicos (temperatura del aire, velocidad y dirección del viento) en algunos puntos del lugar de experimentación, el modelo obtiene el valor del módulo de la velocidad del viento y su dirección en el resto de los puntos de la zona, teniendo en cuenta los efectos que sobre estas magnitudes ejercen los diversos obstáculos orográficos.

Los experimentos han confirmado la idoneidad del modelo en la superficie terrestre. Se pretende ahora que el diagnóstico del campo de viento se extienda a niveles superiores de la atmósfera.

Pese a resolver la influencia que valles, gargantas y demás accidentes topográficos ejercen sobre el viento, lo que le convierte en un mecanismo muy útil de cara a la simulación de la propagación de un incendio, el modelo no puede abarcar todos los fenómenos observados en la meteorología de montaña. Son cada vez más los testimonios de personas relacionadas con las labores de extinción que hablan de la formación de extraños remolinos, con cambios bruscos en la intensidad y dirección de propagación. Estos vórtices o remolinos se han detectado fundamentalmente a sotavento de la montaña.

Nuestro equipo ha podido ya determinar las condiciones atmosféricas y hora del día más probables para la formación de los vórtices. Hemos estudiado su evolución y ubicación aproximada en la ladera de la montaña. Pero, aunque se ha avanzado mucho en el conocimiento de la influencia de la meteorología sobre los incendios forestales, es aún largo el camino que queda por recorrer.

EMILIANO HERNÁNDEZ MARTÍN
Universidad Complutense de Madrid.

JULIO DÍAZ JIMÉNEZ
Area de Medioambiente
de la C.U.S.P. Madrid.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Viajes por el tiempo (2)

Resumen del artículo anterior (véase Investigación y Ciencia, junio de 1994*). Estamos en el año 3001. El* Viajero del tiempo *de H. G. Wells ha desembarcado involuntariamente en las dependencias de Hawkrose & Penking, una empresa de ingeniería pesada. Y tan pesada: ¡Hawkrose & Penking fabrica agujeros negros! La máquina del Viajero está averiada sin remedio, pero tal vez Hawkrose & Penking puedan ayudarle... El Viajero ha sabido de la Relatividad Especial, en la cual la velocidad de la luz es constante, y de la Relatividad General, en la cual la gravitación es consecuencia de la curvatura del espacio. En relatividad "máquina del tiempo" significa "bucle cronomorfo cerrado", abreviado BCC, una línea del mundo cuyo futuro llega a encontrar a su propio pasado. La paradoja de los gemelos nos hace entrever un tal bucle: Posen se queda en la Tierra, mientras que su gemelo Rodolsky se aleja a velocidad muy próxima a la de la luz y es, cuando regresa, mucho más joven que su hermano. "El tiempo está descoyuntado." Pero, ¿se descoyuntará lo suficiente como para formar un BCC? Hawkrose & Penking pueden fabricar un transmisor de materia conectando un agujero negro con un agujero blanco, formando así un "puente", también llamado "agujero de gusano"... aunque no es lo mismo transmitir materia que viajar por el tiempo. ¿O tal vez sí?*

Nos quedamos mirando mi dibujo de un puente espacio-temporal (*figura 2*), a ver si nos llegaba la inspiración.

"¿Se da cuenta de que antes se creía que los viajes por el tiempo eran teóricamente imposibles, que entrañan una contradicción intrínseca?" dije al Viajero.

"¿Se refiere a la 'paradoja del abuelo'?"

"Así es. La idea se remonta hasta un cuento de René Barjavel, titulado *Le Voyageur Imprudent*. Retrocede uno en el tiempo y mata a su abuelo, de suerte que nuestro padre no llega a nacer ni tampoco nosotros; resulta, pues, imposible que uno se vaya al pasado a matar al abuelo..."

"...Por lo que sí nacemos y entonces vamos al pasado..."

"Exactamente."

"No se me ocurrió hasta después de haber construido mi máquina," apostilló. "Me pregunto si yo... Pero no. El viejo cascarrabias me caía muy bien."

"Ni lo piense. Además, si el problema se estudia desde la mecánica cuántica se puede ver que no hay tal."

"¿Mecánica... qué?"

"Mecánica cuántica. Es posterior a usted. La mecánica cuántica, que es la física subyacente a la materia, no es determinística. Muchos fenómenos, como la desintegración de un átomo radiactivo, son aleatorios. Una de las formas de conferir respetabilidad matemática a la indeterminación es la "interpretación de muchos mundos", inventada por H. Everett. Nuestro mundo es sólo uno entre una familia infinita de 'mundos paralelos', correspondientes cada uno a la concreción de una combinación de posibilidades. Cada posibilidad de desintegración radiactiva se corresponde así con uno de estos mundos paralelos. En 1991, David Deutsch hizo notar que, merced a la interpretación de muchos mundos, la mecánica cuántica no está en contradicción con el 'libre albedrío'. Además, la paradoja del abuelo deja de ser tal, porque el abuelo será (o habrá sido) muerto en un mundo paralelo, no en el primitivo."

El Viajero dedicó algún tiempo a digerir todo esto. "Me está usted preocupando de verdad," dijo al fin. "Si consigo volver a mi tiempo, ¿cómo garantizar que no me he trasladado a un universo paralelo?"

"No tiene por qué preocuparse. Para empezar, no se daría cuenta. Y además, según la interpretación de mundos múltiples, eso es lo que acontece cada vez que los átomos de que estamos constituidos optan o no por cambiar su estado cuántico. Saltamos continuamente de este universo a un universo paralelo, uno por cada posible elección de estado cuántico."

"Me parece que deberíamos dejar de lado este asunto de la mecánica cuántica," opinó el Viajero, "y volver a ocuparnos de cuestiones más sencillas. ¿Existe conexión de alguna clase entre los puentes espacio-temporales y las máquinas del tiempo?"

¡"Sí, desde luego!" le respondí. "Fue señalada ya en 1988, cuando Michael Morris, Kip Thorne y Ulvi Yurtsever se dieron cuenta de que se podía combinar un puente con la paradoja de los gemelos al objeto de obtener un BCC. La idea consiste en dejar fijo el extremo blanco del agujero y remolcar el extremo negro (en línea recta o en zigzag) a una velocidad muy cercana a la de la luz."

La figura 3 muestra cómo permite el puente viajar por el tiempo. El extremo blanco del puente permanece estático en el espacio; y el tiempo, indicado por el número de días, transcurre a ritmo normal. El extremo negro del puente zigzaguea hacia adelante y atrás a casi la velocidad de la luz; se produce así una dilatación de las duraciones y, para un observador que acompañe a ese extremo en su movimiento, el tiempo corre más lentamente. Pensemos en líneas del mundo descritas por los gemelos y tracemos (mentalmente) rectas que unan puntos marcados con los mismos tiempos. Al principio, la inclinación de estas líneas es menor que 45 grados, por lo que no son cronomorfas y ninguna partícula material puede pasar de una a otra. Pero en cierto instante, en este caso en el tiempo marcado con un 3, la recta alcanza una inclinación de 45 grados. En cuanto es atravesada esta 'barrera del tiempo' se puede viajar desde el espacio 'normal' del extremo blanco al extremo negro del puente a lo largo de una línea cronomorfa. Un ejemplo de tal línea del mundo va desde el punto 5 del extremo blanco del puente al punto 4 del extremo negro. La inclinación de esta línea es un poco superior a 45 grados.

Una vez allá, podemos volver a pasar por el puente siguiendo una curva cronomorfa; al ser ésta un atajo, puede ser recorrida en un tiempo muy pequeño; de hecho, hemos unido "instantáneamente" el extremo negro 4 al extremo 4 correspondien-

te. ¡Estamos en el mismo lugar del que hemos partido, pero un año antes! ¡Hemos viajado por el tiempo! Esperando un año cómodamente instalados en nuestro extremo blanco quedará cerrado el BCC y nosotros acabaremos en el mismo lugar y tiempo del que hemos partido. Fijémonos en que los ‘extremos’ del puente espacio-temporal no son los que tienen la misma coordenada *t* en el espacio de Minkowski, sino los que tienen igual “tiempo transcurrido” para observadores que se desplazan con ellos.

Podemos hacernos un puente espacio-temporal de fabricación casera. Tomemos una bolsa de plástico grande, abrámosla por el fondo. Dejemos fijo uno de sus extremos e imaginemos que otro va y viene justo a un poco menos que la velocidad de la luz, para que el tiempo corra más lentamente en su interior. Cuando el extremo distante de la bolsa pase cerca, vamos hasta él y llegaremos a cierto instante de nuestro pasado. Luego, nos colamos por el interior de la bolsa y, al atravesarla, habremos retrocedido en el tiempo.

La distancia que hay que recorrer a través del espacio ordinario depende de lo mucho que deba desplazarse el extremo derecho del puente en cada tramo de su zigzag. En el espacio de más de una dimensión, en lugar de zigzaguear puede trazar una espiral, lo que equivale a hacer que el extremo negro describa una órbita circular a velocidad próxima a la de la luz. Para conseguirlo, podríamos preparar un sistema binario de agujeros negros que girasen uno alrededor del otro en torno al centro común de masa del sistema.

“Cuanto más se adentre en el futuro el punto de partida, más se podrá retroceder en el tiempo a partir de ese punto,” le dije al Viajero.

“¡Maravilloso! Si hace falta, no me importa esperar varios años.”

“¡Ah! Es que hay una pega muy seria. No se puede retroceder hacia el pasado más acá de la barrera del tiempo; es imposible alcanzar un tiempo anterior al de la construcción del puente. No veo esperanzas de que pueda retornar a su época.”

La consternación se dibujó en su rostro. Y en el mío. Finalmente supe lo que mi subconsciente estaba tratando de decirme. Era, en efecto, cosa de dinero. Pero la ganancia era imposible por idéntica razón.

“Tenemos además otro problema,” añadí. “El departamento de I+D de *Hawkrose & Penking* está trabajando en ello, pero sólo tenemos un prototipo de laboratorio. La cuestión es: ¿Podemos realmente construir uno de estos dispositivos? ¿Se puede atravesar el puente? Podemos sin duda construir el puente y desplazar sus extremos; eso está resuelto. Se trata solamente de crear campos gravitatorios intensos y ésa es la especialidad de nuestra empresa.

”Pero el problema que más me inquieta es lo que llamo ‘efecto pellizco’. Consiste en que, cuando una masa se desplaza a través de un puente espacio-temporal, o ‘agujero de gusano’, el pasadizo tiende a cerrarse sobre ella y atraparla. Para pasar sin quedar atrapados por la cola, habría que correr más deprisa que la luz, y eso no nos sirve.”

“¿Por qué razón?”

“La forma más sencilla de verlo es representar la geometría del espacio-tiempo mediante un *mapa de Penrose*, inventado por Roger Penrose, físico-matemático del siglo XX. Para cartografiar la Tierra en una hoja plana es preciso distorsionar los ángulos, las distancias o ambas cosas; los meridianos, por ejemplo, pueden experimentar diferentes curvaturas. El mapa de Penrose de un espacio-



1. Combinación de dos paradojas: uno de los gemelos de Langevin mata al primer hombre

tiempo también distorsiona las coordenadas, pero está concebido de manera que los conos de luz no sufran variación: siguen formando 45 grados. La figura 4 muestra un mapa de Penrose de un puente. Toda trayectoria espaciomorfa que arranque de la entrada del puente, como el dibujado, ha de acabar en la singularidad del futuro. No hay forma de llegar hasta la salida sin superar la velocidad de la luz."

"Lo cual es imposible," se lamentó el Viajero.

"Bueno, tal vez no. Tenemos la esperanza de eludir esta dificultad entretejiendo *materia exótica* en el agujero de gusano, que ejercería una enorme presión negativa, como si fuera un muelle en tensión. Pero en 1991 Math Visser propuso una segunda geometría que daría lugar a un puente mejor. La idea consiste en recortar en el espacio dos cubos idénticos y pegar sus caras correspondientes. Después reforzaremos las aristas del cubo con materia exótica.

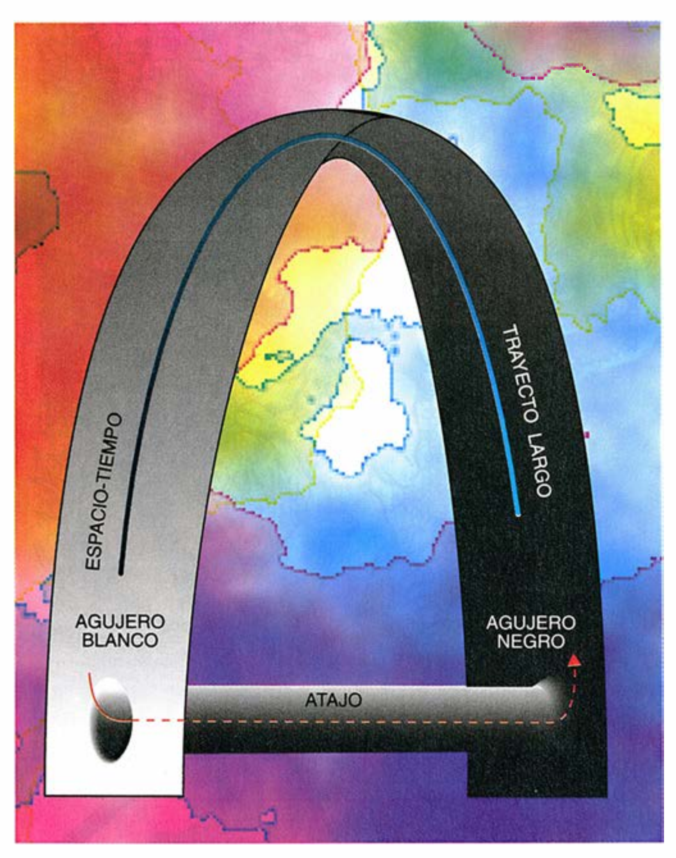
"Existe, por otra parte un método más antiguo que elimina la necesidad de materia exótica. Y como no exige construir un agujero negro, no se da el efecto de barrera temporal. Se puede retroceder en el tiempo tanto como se quiera. Depende de lo que la naturaleza se guarde en la manga." Mucho dinero, si damos con el filón...

"No le sigo," dijo el Viajero del tiempo, interrumpiendo mis doradas fantasías.

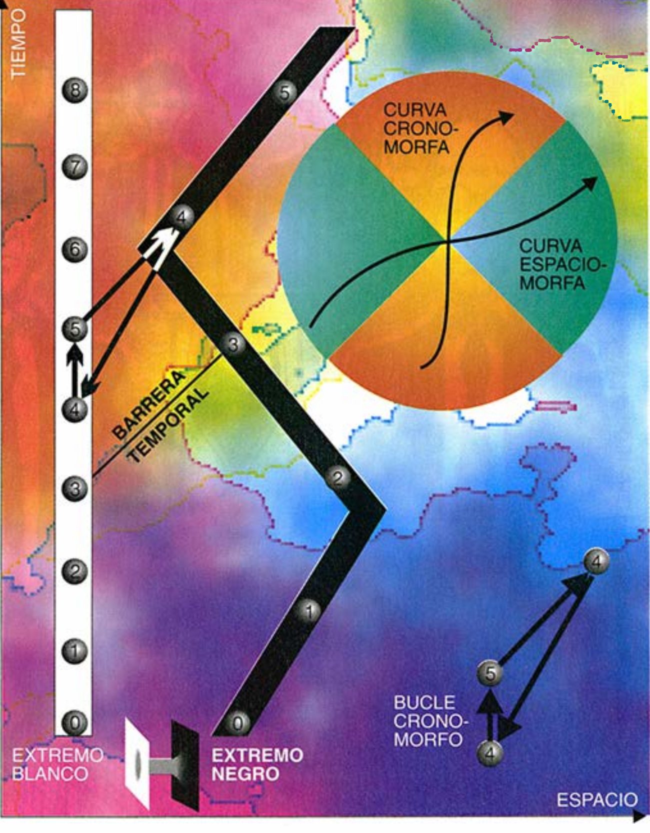
"Hablo de utilizar una máquina del tiempo que se presente en la naturaleza. Un agujero negro en rotación, que se forma tras el colapso gravitatorio de una estrella giratoria. La solución de Schwarzschild para las ecuaciones de Einstein corresponde a un agujero negro estático, formado por colapso de una estrella no giratoria. Roy Kerr, en 1962, resolvió las ecuaciones correspondientes a un agujero negro rotatorio, hoy conocido como *agujero negro de Kerr*. (Hay dos clases más: el *agujero negro de Reissner-Nordstrom*, que aunque estático posee carga eléctrica, y el *agujero negro de Kerr-Newman*, que es giratorio y posee además carga eléctrica.) Es casi un milagro que exista solución explícita, y absolutamente maravilloso que Kerr lograse descubrirla. De una complicación extraordinaria, comporta consecuencias espectaculares.

"Una de ellas es que en el interior del agujero negro ya no hay una singularidad puntual. Lo que hay, en cambio, es una singularidad anular, contenida en el plano de rotación (*figura 5*). En un agujero negro estático toda la materia ha de caer en la singularidad, pero en uno giratorio no tiene por qué ser así. Puede viajar por encima del plano ecuatorial y pasar a través del anillo. También el horizonte de sucesos se torna más complejo; la verdad es que se escinde en dos. Las señales o la materia que penetran en el horizonte exterior no pueden ya volver a salir; ni las señales ni la materia emitidas por la singularidad pueden viajar más allá del horizonte interior. Todavía más allá, aunque tangente al horizónte exterior en los polos, se encuentra el límite estático. Por el exterior de él, las partículas pueden moverse a voluntad. Por el interior, las partículas han de girar en la misma dirección que el agujero negro, aunque todavía pueden escapar moviéndose en sentido radial. Entre el límite estático y el límite exterior se encuentra la ergosfera. Si disparamos un proyectil contra el interior de la ergosfera y lo dividimos en dos piezas, de forma que una de las cuales sea capturada por el agujero negro mientras que la otra escapa, resulta posible extraer parte de la energía de rotación del agujero negro.

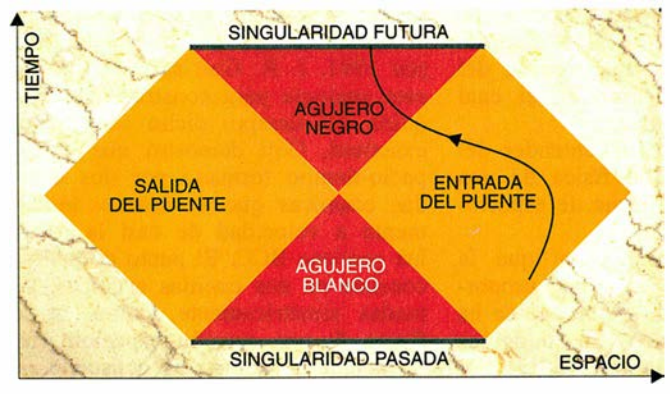
"La consecuencia más espectacular de todo esto es, sin embargo, el mapa



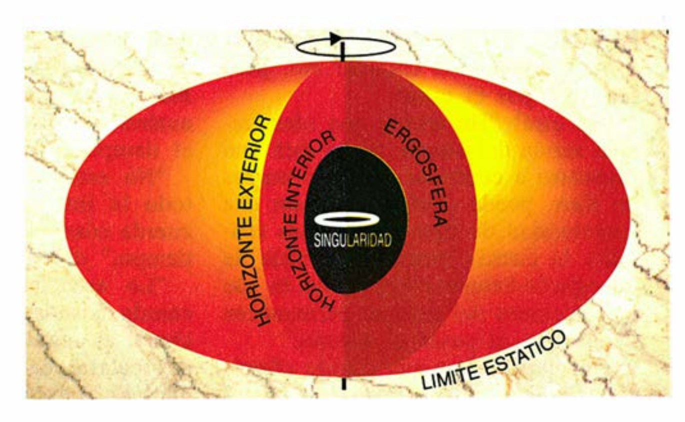
2. Forma de utilizar un puente como transportador de materia



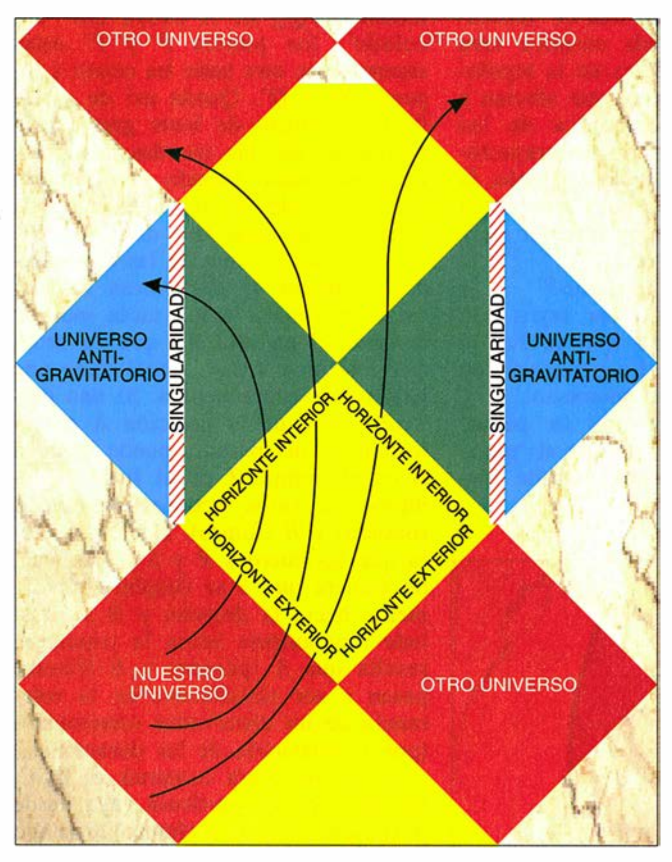
3. Transformación de un puente en máquina de exploración del tiempo



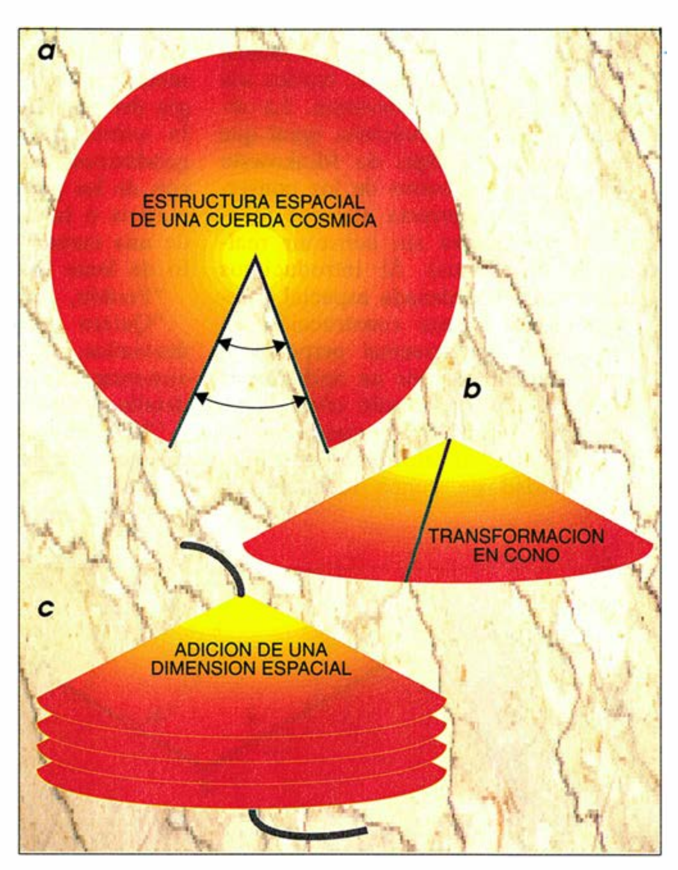
4. *Mapa de Penrose de un puente*



5. *Estructura de la sección de un agujero negro en rotación*



6. *Mapa de Penrose de un agujero negro en rotación*



7. *Estructura espacial de las cuerdas cósmicas*

de Penrose de un agujero negro de Ker (*figura* 6). Los rombos blancos representan regiones asintóticamente llanas del espacio-tiempo, una en nuestro universo, y varias cuya existencia no es obligada. La singularidad se ilustra mediante líneas de trazos, para indicar que es posible pasar a su través (o pasar por el interior del anillo). Más allá de las singularidades se encuentran universos antigravitatorios, en los cuales las distancias son negativas y la materia repele a la materia. Todo cuerpo instalado en esta región será rechazado a distancia infinita de la singularidad. Se muestran varias trayectorias lícitas (recorridas a velocidad menor que la luz), representadas por caminos curvos; conducen a través del puente o agujero de gusano hasta cualquiera de sus salidas. Pero el rasgo más sorprendente de todas reside en que eso es sólo una parte del diagrama completo, que se repite indefinidamente en dirección vertical, proporcionando un número infinito de entradas y salidas.

"Si en lugar de un puente utilizásemos un agujero negro en rotación y remolcásemos sus entradas y salidas a una velocidad próxima a la de la luz, conseguiríamos una máquina del tiempo mucho más práctica, que podríamos aprovechar sin caer en la singularidad."

El Viajero del tiempo se frotó las manos de contento. "Entonces pronto estaré de vuelta en mi tiempo. Vamos, preparemos mi máquina."

"Un momento, no tan deprisa. Déjeme consultar el ordenador. ¡Qué mala suerte! No hay agujeros negros giratorios a nuestro alcance."

"Pero, ¿no dijo usted que los puentes espacio-temporales podían ser atajos a través del espacio-tiempo?"

"Si están construidos. Tenemos uno en construcción que da al agujero negro giratorio más cercano, pero el personal está en huelga y todavía no está terminado."

El Viajero acusaba el más total desencanto. Y yo. Pero... ¿qué había estado yo observando la otra noche

en el sistema hipermedia de realidad virtual? ¿La curda cómica? No, pero era algo por el estilo.

¡Ya está! "He tenido una idea, recién salida del magín. Si no está uno dispuesto a controlar agujeros negros de Kerr, puede conformarse con una singularidad de tipo mucho más sencillo: la cuerda cósmica. Se trata de un espacio-tiempo estático, con lo que las secciones del espacio permanecen invariables al pasar el tiempo."

Para representar una cuerda cósmica conviene ceñirse a dos dimensiones del espacio. Recortemos un sector en un círculo y peguemos los bordes (*véase la figura 7a*). Con papel, el resultado es un cono (*véase la figura 7b*) , pero matemáticamente es posible identificar los bordes sin introducir ninguna curvatura. La dimensión temporal funciona igual que en el espacio-tiempo de Minkowski (y para que los conos de luz conserven su forma correcta hay que identificar los bordes sin construir realmente los conos). Si introducimos una tercera coordenada espacial y repetimos la misma construcción en cada sección transversal perpendicular a ella, obtenemos un apilamiento lineal. Esa es la cuerda cósmica en su generalidad. Para construir un modelo material, enfilemos una buena cantidad de conos idénticos en una cierta longitud de... bueno, de cordel (*véase la figura 7c*). Recordemos: cada cono es una sección del auténtico espacio-tiempo en el cual el tiempo es constante.

"No estoy seguro de entender del todo la interpretación física de una cuerda cósmica en forma de espacio-tiempo," dijo el Viajero.

"Lo esencial consiste en que la cuerda cósmica posee masa, proporcional al ángulo del sector que se ha de recortar del disco. En todos los puntos, a excepción del vértice del cono, el espacio-tiempo es localmente llano, lo mismo que el espacio-tiempo de Minkowski. La aparente curvatura de un cono real es 'inofensiva'. Pero la cuerda cósmica crea modificaciones globales en la topología del espacio-tiempo, que afectan a la estructura macroscópica de las geodésicas, esto es, de las trayectorias de las partículas. Por ejemplo, la materia o la luz que pasa muy cerca de una cuerda cósmica sufre el efecto de lente gravitatoria."

"Perdón, ¿cómo ha dicho?"

"Quiero decir que los rayos son desviados, lo mismo que la luz al atravesar una lente. Lo explicaré con detalle dentro de un momento.

"Una cuerda cósmica se parece mucho a un puente, porque el 'pegamento' matemático nos permite 'pasar de un salto' el sector recortado en el espacio-tiempo de Minkowski. Allá por 1991, J. R. Gott sacó partido de esta analogía para construir una máquina del tiempo: dicho con mayor exactitud, Gott demostró que el espacio-tiempo formado por dos cuerdas cósmicas que se cruzan mutuamente a velocidad de casi la de la luz contiene BCC. El punto de partida consiste en dos cuerdas estáticas, situadas simétricamente, como en la figura 8: una sección espaciomorfa, en la que el tiempo es constante.

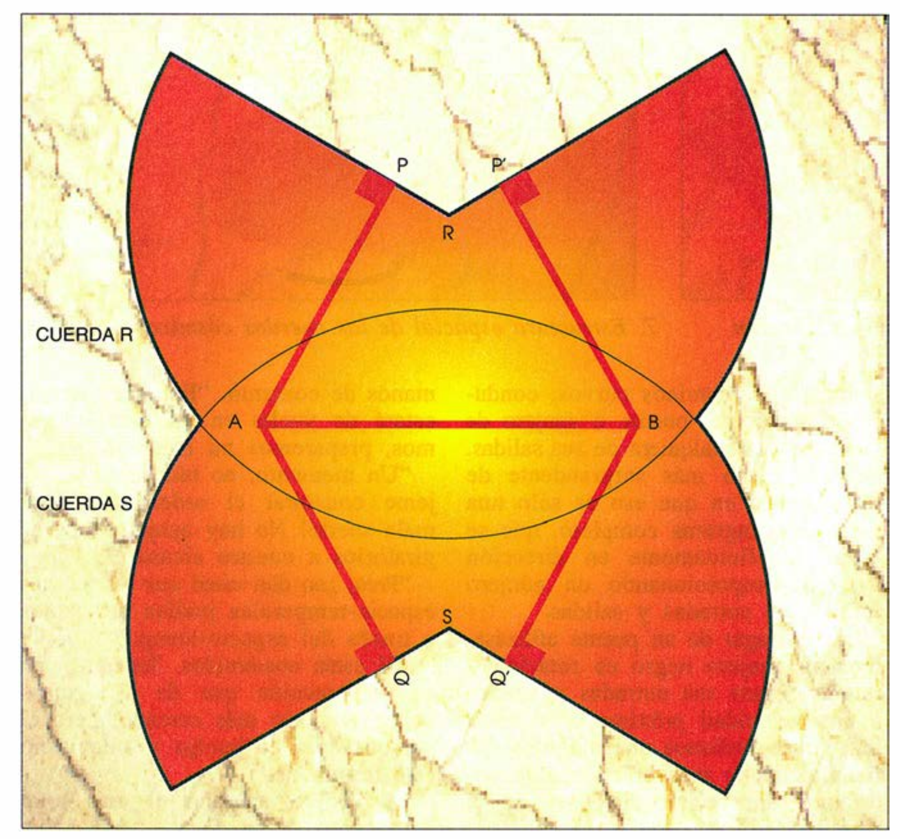
"La figura muestra tres geodésicas que unen los puntos A y B: la horizontal AB, la línea $APP'B$ y su simétrica $AQQ'B$. A causa del 'encolado', los puntos P y P' están superpuestos; otro tanto les ocurre a los puntos Q y Q'. Queda así de manifiesto el efecto de lente gravitatoria producido por las cuerdas cósmicas: un observador situado en B vería tres copias de A, una a lo largo de cada una de estas tres direcciones.

"Gott calculó que, si las dos cuerdas cósmicas se encuentran lo bastante próximas, la luz tarda más en recorrer el camino AB que en recorrer los otros dos. Lo cual tiene una importante consecuencia. Si una partícula parte de la posición A en un instante T del pasado, puede llegar a B en el tiempo T en el futuro. Llamemos a estos acontecimientos A (pasado) y B (futuro). Haciendo ahora que las cuerdas R y S se muevan, de manera que S se desplace rápidamente hacia la derecha y R se traslade rápidamente hacia la izquierda, resulta que A (pasado) y B (futuro) pasan a ser simultáneos en la referencia de un observador estacionario (por la dilatación de las duraciones.)

"Así pues, para construir el BCC, hacemos que la partícula vaya desde A (pasado) hasta B (futuro) pasando por $P = P'$; después, por simetría, la hacemos retornar desde B (futuro) hasta A (pasado) yendo por $Q = Q'$. Los cálculos de Gott muestran que si las cuerdas cósmicas viajan a velocidad cercana a la de la luz, tal BCC existe... En sentido matemático, claro está."

El Viajero del tiempo se rascó la cabeza e hizo una mueca. "¿Es físicamente realizable semejante plan?"

"Pues verá... En 1992, Sean Carroll, Edward Farhi y Alan Guth demostraron que no hay en el universo suficiente energía disponible para construir una máquina de Gott para viajar por el tiempo. Con mayor exactitud, el universo jamás contiene suficiente materia para suministrar tan enorme energía a partir de los productos de desintegración de partículas."



8. Dos cuerdas cósmicas, situadas en un mismo plano para mayor claridad

"Parece que vuelvo a estar atrapado para siempre en mi propio futuro."

"No es tan evidente. Si pudiéramos desarrollar una nueva fuente de energía que fuera lo suficientemente potente... Pero, que yo sepa, todavía no contamos con nada por el estilo. Recuerdo, sin embargo, que al examinar la distribución de las galaxias en nuestro universo se ha visto que éstas se apiñan en vastas escalas, formando estructuras cuya longitud es de decenas de millones de años-luz. Este apiñamiento es demasiado grande para haber sido causado por la atracción gravitatoria entre la materia conocida."

"¿Y eso quiere decir...?"

"Una teoría es que los apiñamientos tuvieron su 'germen' en cuerdas cósmicas que se dan de forma natural. Suponiendo que los bancos de datos de *Hawkrose & Penking* contengan las coordenadas de un residuo natural de cuerda cósmica —y suponiendo que esté preparado un puente para transportarle hasta allí— tal vez podamos todavía devolverle a casa." Y por mi parte, ganar una fortuna...

"De ser así, resultaría que la madre naturaleza ha superado todas las habilidades ingenieriles de *Hawkrose & Penking*."

"Excepto en que siguen siendo necesarios nuestros agujeros de gusano para llevarle hasta la cuerda cósmica," le hice notar, mientras pedía al ordenador que buscase una cuerda cósmica adecuada próxima a un enlace por puente espacio-temporal. Al cabo de algunos segundos, el ordenador reclamó mi atención. "Ha tenido suerte," le dije. "Tome el de las 3:25 UT que sale de Estación Central Selene para Betelgeuse, transborde en Epsilon-Aurigae al puente estelar Ophiuchus, y suba después a la nave de cercanías a Aldebarán. Pediré un astrotaxi para usted, embalaré su máquina y le compraré un billete de viaje."

"¿No saldrá muy caro todo eso?"

"Pues sí," respondí. "El salario de un año. Pero hay una manera de que pueda usted reembolsarme." Mientras le hablaba, le di al ordenador nuevas instrucciones.

"¿De qué forma?" inquirió el Viajero del tiempo. "Estoy dispuesto a lo que sea con tal de volver a finales del siglo XIX."

La impresora se puso en marcha. Le entregué un mazo de hojas. "Aquí tiene un listado completo de las cotizaciones de los principales valores en todo el período 1895-2999. Quiero que abra un fondo de inversión a mi nombre. Invierta una peseta en una cuenta del Banco de España; sigue existiendo todavía y también existía en su tiempo. Y utilice la información que le he dado para conseguir que la inversión crezca muy rápidamente. ¿Ha comprendido?"

"Desde luego. Si puede usted predecir correctamente el futuro del mercado, tiene la fortuna garantizada."

"Exactamente. Bueno, con tal de que no resulte usted conducido a un mundo paralelo. Pero incluso así, es muy probable que nuestras versiones paralelas en el mundo paralelo pasado cuyo futuro se convertirá en éste se hallen realizando lo mismo. La historia tiene muchísimo de convergencia. Estoy dispuesto a correr el riesgo. Establezca un patronato para garantizar que el sistema sigue funcionando. Cóbrese el 50 por ciento de los beneficios como comisión de gestión. Establezca que el fondo venza el 27 de enero de 3001, o sea mañana, a la presentación de mi firma. Aquí tiene una muestra de mi firma para que sea registrada."

"¿Y qué pasa si le defraudo y me quedo con todo el capital?", preguntó.

"En tal caso es posible que yo tenga que viajar al siglo XIX para convencerle de que no lo haga," repliqué.

"¡Oh, muy bien! No tema, haré lo que pide." El astrotaxi llegó y el Viajero se marchó en él.

Hay una vena de apostador en mi temperamento. Había invertido el salario de un año en devolverle a su tiempo. Pero si la jugada me salía bien... Vaya, digamos que mañana tengo una cita importante en el Banco de España.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TIME TRAVEL WITHOUT THE PARADOX. M. Chown, en *New Scientist*, n.º 28, página 23, 28 de marzo de 1992.

NEUTRINOS RIPPLES, AND TIME LOOPS. J. Cramer, en *Analog*, págs. 107-111, febrero de 1993. David Deutsch, *Physical Review D*, octubre de 1991.

CLOSED TIMELIKE CURVES PRODUCED BY PAIRS OF MOVING COSMIC STRINGS: EXACT SOLUTIONS. Richard Gott, en *Physical Review Letters*, n.º 66, páginas 1126-1129, 1991.

EN BUSCA DE LA FRONTERA DEL TIEMPO. John Gribbin, Celeste Ediciones, Madrid, 1993.

LES TROUS NOIRS. Jean-Pierre Lumenet, Editions Belfond.

WORMHOLES, TIME MACHINES, AND THE WEAK ENERGY CONDITION. Michael S. Morris, Kip. S. Thorne y Ulvi Yurtsever, en *Physical Review Letters*, n.º 61, págs. 1446-1449, 1988.

WORMHOLES, TIME TRAVEL AND QUANTUM GRAVITY. Ian Redmount, en *New Scientist*, págs. 57-61, 1990.

Libros

Luis Alonso, Ramón Margalef, Fernando Atrio y Carlos Castrodeza

Ciencia en Iberoamérica

¿Periferia o marginalidad?

Geschichte der Wissenschaften in Lateinamerika, por AA.VV. Universität Rostock, 1992.

Mutis and the royal botanical expedition of the nuevo reyno de granada. Dirigido por M. Pilar de San Pío Aladrén. Villegas Editores/Lunwerg Editores; Bogotá-Barcelona, 1992.

Elementos de orictognosia. 1795-1805, por Andrés Manuel del Río. Edición y estudio introductorio de Raúl Rubinovich Kogan. UNAM; México, 1992.

Briefe aus Amerika 1799-1804, de Alexander von Humboldt. Edición preparada por Ulrike Moheit. Akademie Verlag; Berlín, 1993.

El distanciamiento operado en Iberoamérica con respecto de su antigua metrópoli desde la independencia ha abonado el mutuo desconocimiento, no vencido ni siquiera por los puentes que, sobre todo con Argentina, se tendieron en el primer tercio de nuestro siglo. Pero lo cierto es que en sus cimientos la ciencia hispanoamericana constituye un capítulo brillante de la ciencia española. Lo que no resta valor ni a la aportación de los criollos ni al progreso autónomo registrado desde mediados de la centuria pasada.

Iberoamérica presenta hoy, vinculado en torno a la revista *Quipu*, un plantel inquieto de historiadores de la ciencia autóctona. Cuando pase el sarampión sociologista que todavía tiñe muchos trabajos y vayan incorporándose a la tarea promociones más atentas a la adquisición y desenvolvimiento interno de las teorías e innovaciones técnicas en los últimos cinco siglos descubriremos, sin duda, otro mundo nuevo.

Muchos logros de los científicos iberoamericanos cuentan ahora con el respaldo de centros europeos y norteamericanos. Ocurre así, por ejemplo, con las floras de diferentes países, la medicina tropical, la preservación de la biodiversidad o las observaciones astronómicas. En el caso de la historia de la ciencia nos sirve de muestra la colaboración entre la Universidad alemana de Rostock y la brasileña de Campinas, atestiguada en *Geschichte der Wissenschaften in Lateinamerika* ("Historia de las ciencias en Latinoamérica").

Tras varios trabajos sobre criterios metodológicos (desarrollo de la ciencia en su contexto social particular, vale decir, con referencias a la identidad nacional y dependencia del exterior de un continente alejado de los centros del saber), se suceden las colaboraciones dedicadas a distintas aportaciones regionales, que permiten hacerse con una visión panorámica. Sobresalen los apartados consagrados a Brasil, desde un repaso general a las distintas disciplinas en el período colonial hasta un estudio pormenorizado de su figura capital, José Bonifacio de Andrada e Silva, hombre de la ilustración e introductor en su país de la nueva química lavoisieriana y cristalografía de Haüy.

Más cercana en el tiempo es la aproximación a la ciencia argentina a través de la revisión de la influencia de Bernardo Alberto Houssay (1887-1991). Su labor en el Instituto de Fisiología en la Universidad de Buenos Aires destacó por su investigación del metabolismo de los carbohidratos, que le valieron el Nobel. Se cubre la vertiente ingenieril y técnica de Argentina con un prototipo de las emigraciones europeas del siglo pasado, y símbolo de la savia no latina que recibió el cono sur. Nos referimos a Hermann (castellanizado Germán) Avé-Lallemant, nacido en Lübeck en 1835 y arribado a Argentina en 1870 donde puso los cimientos de la minería de la nación y levantó el primer mapa de la provincia de San Luis, de la que estudió, además, su riqueza natural.

José Celestino Mutis (1732-1808) insufló en Santa Fe de Bogotá el aire de la ciencia moderna. Lo explican, acompañado de un alarde iconográfico, las diversas colaboraciones aunadas bajo el título de *Mutis and the Royal Botanical Expedition of the Nuevo Reyno de Granada.* Complételo el lector con otro libro de hechuras más humildes, pero valioso en su contenido, *José Celestino Mutis. Escritos botánicos,* de M. Paz Martín Ferrero.

Nacido en el seno de una familia numerosa descendiente de libreros, se formó en la Universidad de Sevilla y en el Colegio de Cirugía de Cádiz. A los veintidós años recibió el título de médico tras someterse al correspondiente examen ante el tribunal del Real Protomedicato en Madrid, ciudad donde reside hasta 1760 regentando la cátedra de anatomía del Hospital General. Acepta enrolarse, en calidad de médico aunque decidido a estudiar la naturaleza de Nueva Granada (la actual Colombia), en el séquito de Pedro Messía de la Cerda y Cárcamo, nombrado virrey.

En 1761 se encuentra ya en Santa Fe. Alterna su labor médica con la docencia de matemáticas en el Colegio del Rosario. Había recibido en Cádiz una aceptable formación geométrica, suficiente para entender la física cartesiana; poseía, además, rudimentos de cálculo infinitesimal, necesarios para comprender la física newtoniana. Partidario de la segunda, se hizo con las obras europeas que la difundieron en la primera mitad del siglo, y se ocupó de que los alumnos tuvieran un conocimiento directo del texto mediante una traducción de parte de los *Principia.* Lo mismo que Jorge Juan, colaboró en el cambio de mentalidad hacia la aceptación del copernicanismo.

La actividad médica de Mutis se desarrolló en tres frentes: la práctica diaria, la búsqueda de plantas curativas y la institucional. A falta de médicos examinados ante el Protomedicato, la Audiencia se veía obligada a expedir permisos a empíricos hábiles. La situación sanitaria de Nueva Granada se hallaba muy retrasada con respecto a otros virreinatos, y no digamos con respecto a la metrópoli. Por eso participó en la redacción de varios planes de estudio para la reinstauración de la Facultad de Medicina, en línea con los propuestos por Olavide en Sevilla y Blasco en Valencia; suponía el abandono de los residuos galenistas y entronizaba la anatomía, la fisiología y la patología centroeuropeas. En cirugía recogía las ideas de su maestro Virgili, fundador de los Colegios de Cádiz y Barcelona. Para él, la medicina compendiaba y necesitaba de las demás ciencias, por cuyo motivo debían incluirse en su estudio.

La fama de Mutis, sin embargo, va asociada a la "Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada",



Mutisia clematis, *pintada por Salvador Rizo*

un proyecto suyo aprobado por Madrid muchos años después de su primera solicitud. Fracasó en parte (en lo concerniente a presentación de los resultados), pero sirvió de modelo para cualquier otra revisión florística que en adelante se acometiera, al tiempo que congregó en su entorno una auténtica escuela de profesionales complementarios. Mutis careció de una preparación formal en historia natural, pero su proclamado autodidactismo hay que tomarlo *cum mica salis*. Los colegios de cirugía contaban con su jardín botánico, y así quiso Virgili que fuera en Cádiz. En sus años de Madrid, Mutis trabó estrecha amistad con Barnades, un perfecto conocedor de la doctrina de Linneo de la boca de su maestro Sauvages. Y muy cabales debieron ser las descripciones de las plantas que él remitió al autor de *Species plantarum* en sus primeros escarceos botánicos para que éste confiara en el propósito del gaditano de tomar el relevo del infortunado Pehr Löfling.

La secular explotación de minería de Nueva España (el actual México) favoreció un mayor desarrollo de las instituciones que en el caso novogranadino. En el último tercio del XVIII existía allí un tramado criollo pujante e ilustrado, que no acabó de recibir con buenos ojos las distintas misiones que llegaron de la metrópoli, encabezaran éstas Delhúyar, Sessé o Manuel Andrés del Río. El tiempo torció muchas voluntades por la misma fuerza de la evidencia, la singular preparación de los enviados, que uncirían a Nueva España en la modernidad. Así se reconoce en las páginas que preceden a esta edición facsímil de los *Elementos de Orictognosia. 1795-1805*, de Andrés del Río, preparada por la UNAM.

Hubo, en efecto, una relación de continuidad de maestro a discípulo entre Del Río y la geología mexicana de hoy, a través de Antonio del Castillo y José Guadalupe Aguilera, por citar dos de sus máximos exponentes.

Andrés Manuel del Río nació en Madrid en 1764. Tras superar el grado de bachiller en artes que le concedió la Universidad de Alcalá, pasó a las minas de Almadén para conocer las técnicas y sistemas de beneficio que estaba enseñando allí Heinrich Cristóbal Storr, uno de los muchos expertos extranjeros que el gobierno había contratado para modernizar el país. Y, en cumplimiento de otra de las medidas complementarias, la de enviar los jóvenes mejor dotados al extranjero, Del Río llegó a París en 1783 para dominar la fabricación de porcelanas con Jean Darcet. Cuatro años después saltaba a Friburgo junto a Gottlob Werner, fundador de la escuela neptunista; con él estudió orictognosia —mineralogía práctica— y, con Lempi, geometría subterránea. Prosiguió su formación en Schemnitz, donde conoció el método de beneficio por toneles —variante del método de amalgamación que consistía en calentar las menas antes de la acción del mercurio— y el beneficio del hierro. Tras una breve estancia en Inglaterra, tornó a París, donde ahondó en química en el laboratorio de Lavoisier, quien a la sazón se esforzaba, con el cristalógrafo Haüy, por establecer un nuevo sistema de pesos y medidas.

Fausto Delhúyar, pese a las resistencias autóctonas, no dudó en llamarlo para sus planes de instauración de las enseñanzas técnicas. Dictaba su primera clase de mineralogía el 27 de abril de 1795. Al no disponer de apuntes, redactó lo que sería la primera parte de los *Elementos de Orictognosia.* Además de las clases teóricas, era obligatorio saber sistematizar los minerales y hacer salidas al campo para ir configurando la geografía mineralógica del país.

Traídos los minerales al laboratorio, analizaba su naturaleza. Así descubrió el elemento número 23, sacado de la mena de "plomo pardo" de Zimapán, cuya prioridad le reconoció por fin Berzelius, tras una azarosa historia de dudas y errores. Su extraordinaria preparación fue requerida también para resolver el problema de la inundación de las minas, que superó con su máquina de columna de agua y la introducción de la máquina de vapor. Culminó esa labor técnica con el establecimiento de la ferrería de Coalcomán, para beneficiar las menas ferríferos y forja del hierro.

Remató su tarea docente con la publicación de libros y artículos, suyos o traducidos con anotaciones originales, en muchas ocasiones las primeras versiones al español. Así fue como abandonó la sistematización morfológica werneriana por la sistematización química y cristalográfica de los minerales. Su puesta al día se refleja claramente en las distintas revisiones de los *Elementos*. La primera parte de éstos aparecieron en 1795 y cubren las dos primeras clases del sistema de Werner: tierras raras y sales, según la relación de afinidad, nula en las primeras, con el oxígeno. Las clases seguían el patrón taxonómico (familias, géneros, especies y variedades) que se aplicaban a los otros dos reinos naturales. La segunda parte de los *Elementos* se editó en 1804, con varias innovaciones, como la incorporación de la nueva nomenclatura química, introducida por Aréjula y la cartografía de Humboldt.

Alexander von Humboldt (1769-1859) fue uno de los principales valedores en Europa de la ciencia española. A él se le debe, por ejemplo, el clima de expectación creado en torno a la Flora de Bogotá acometida por Mutis. La ponderación del trabajo del clérigo gaditano es una constante en sus *Briefe aus Amerika 1799-1804*, epistolario reunido pacientemente, con notas y apéndices sobrios y exactos, por Ulrike Moheit.

Humboldt conjugó el ánimo de los exploradores con la preparación del científico puntilloso, como se desprende de sus cartas, verdaderos artículos destinados a la publicación o a su lectura en foros académicos. Recibió una educación informal en Frankfurt, Berlín y Gotinga hasta que recaló en la Escuela de Minas de Friburgo. Pasó algunos años en la administración prusiana. Pero pudo entregarse a su vocación intelectual gracias a la convergencia de dos circunstancias: la herencia materna y el permiso concedido por el monarca español para viajar por América. Con la compañía de Aimé Bonpland, botánico y naturalista del Museo Nacional de París, recorrió, desde 1799 hasta 1804, unos 10.000 kilómetros, de América meridional a Nueva España. (Una vez en la colonia, se le agregaría Carlos Montúfar.) Aunque ya había empezado a trabajar en la península y las Canarias, con la medición del Teide y el estudio de su flora y volcanes, que le mueven a poner en duda el neptunismo werneriano.

Preparaba las incursiones con guiones suministrados por algún colaborador español, además de las memorias de los viajes realizados por otros (La Condamine, Ulloa). Se llevó de Europa un equipo completo de astronomía, física y química: sextantes de Ramsdem y de Troughton, cronómetro de Louis Berthoud, brújulas, balanza de Dollond, higrómetros, barómetros, electrómetros, termómetros, mapas. Acometía mediciones barométricas y trigonométricas de las cadenas montañosas; declinación, inclinación e intensidad magnéticas; carga eléctrica y cantidad de oxígeno de la atmósfera, composición del aire y su densidad; ortos y ocasos de satélites, eclipses; longitud y latitud de los lugares; temperatura y densidad del agua del mar; dirección de las montañas y constitución de sus capas; influencia del clima sobre el crecimiento y distribución de animales y

plantas; fisiología de los animales (respuesta a la anoxia de alturas).

Los destinatarios de las cajas que va apilando son, de minerales y animales, el Real Gabinete, y, de plantas, el Jardín Botánico de Madrid. Agrega la descripción del lugar de extracción. No menos beneficiarios serán los miembros del parisiense Instituto Nacional (Fourcroy, Delambre, Jussieu), a quienes relata con pormenor las descripciones astronómicas, geofísicas y botánicas de los sitios que va explorando. Terminada la expedición cederá al Museo de Historia Natural de París valiosos especímenes. No se trataba, evidentemente, de mero altruismo, sino de la justificada ambición del científico por ver reconocida su obra. En ese sentido debe entenderse su correspondencia con Joseph Banks, de Londres, y el presidente Jefferson.

Valora el afán de las ciudades de la colonia por la enseñanza de la juventud en las ciencias útiles y la técnica, y aboga por contratar a los mejores profesores de la metrópoli, dando testimonio de su cabal conocimiento de los expertos españoles: "Areyula", Betancourt, Chaix, N. Fernández, Cevallos, Tofiño y Churruca. (L. A.)

Limnología

Obra magistral

A TREATISE ON LIMNOLOGY. THE ZOOBENTHOS, por G. E. Hutchinson. John Wiley and Sons; Nueva York, 1993.

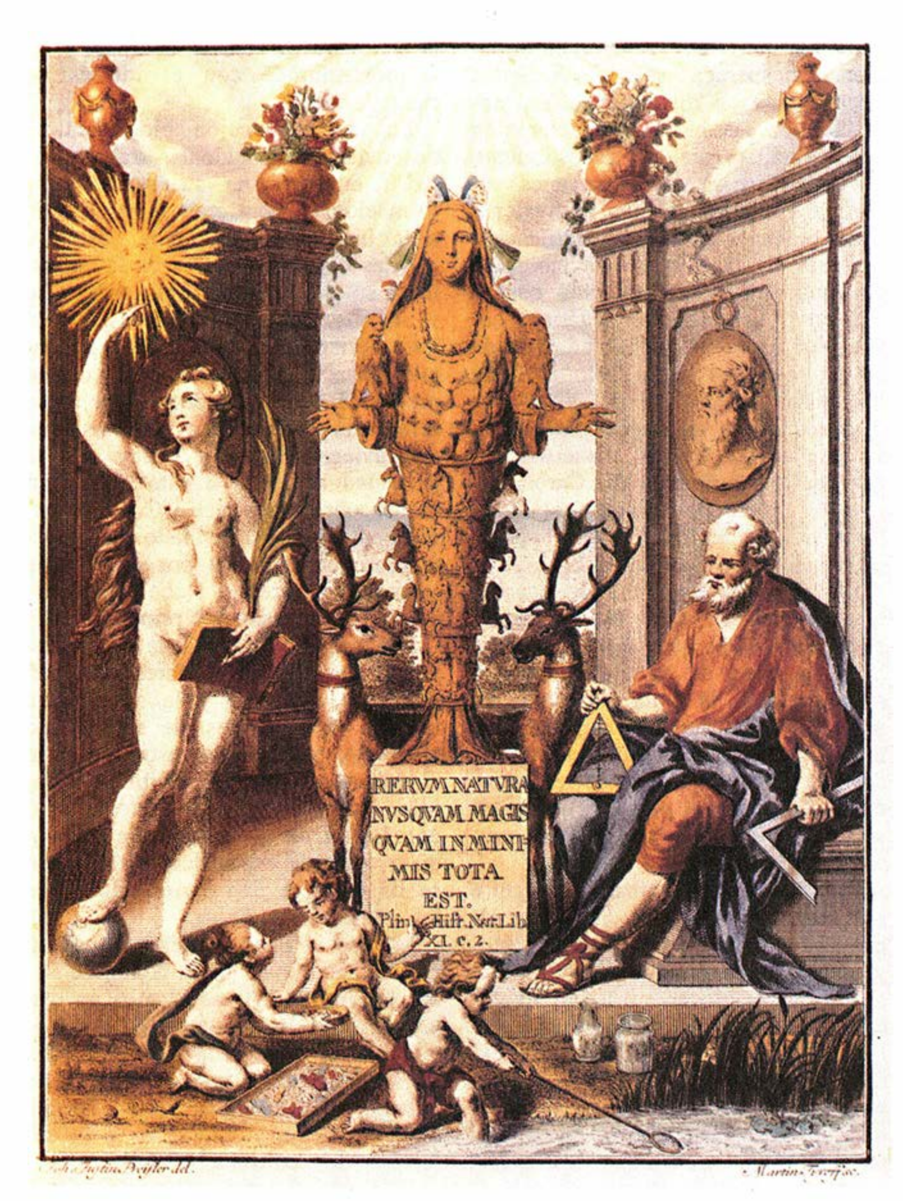
El ilustre ecólogo y limnólogo G. E. Hutchinson falleció en 1991 a la edad de 88 años, dejando incompleto su monumental tratado de limnología. De esta obra se habían publicado ya tres volúmenes, el primero (1957) sobre geografía, física y química, el segundo (1967) sobre el plancton, el tercero (1975) sobre botánica limnológica. Le llegó la muerte cuando este volumen que cubre los animales bénticos estaba en preparación, pero no concluido.

Hubiera sido lamentable dejar que este trabajo se perdiera, porque, aunque un poco amortiguada por la edad, llevaba la estimulante influencia del maestro, con su interés por el detalle, que con demasiada facilidad se olvida en cualquier síntesis preparada con apresuramiento. La edición ha obligado a rehacer las figuras, cuyas fuentes estaban, en muchos casos, apenas indicadas.

Ha sido una tarea amorosamente cuidada principalmente por Yvette H. Edmondson, limnóloga ilustre por derecho propio y capacitada para la labor por haber sido durante muchos años editora de la revista *Limnology and Oceanography.* Otras personas han colaborado en la redacción final de diversos capítulos. Pero el texto retiene el espíritu inconfundible de Hutchinson, con su amor por el detalle poco conocido y con su capacidad para ver de otra manera o reinterpretar cosas que se daban por sabidas.

El primitivo proyecto del autor era añadir, por lo menos, dos volúmenes más a su obra, pero incluso éste ha quedado truncado, porque no trata de los insectos de metamorfosis completa cuyos estados adultos son de vida aérea, categoría que incluye los innumerables dípteros de larvas acuáticas.

El presente volumen lleva un prefacio escrito por el propio Hutchinson, que termina con un "to everyone I say farewell". A Hutchinson le encantaba poner frontispicios y dedicatorias en sus libros y es acertado que éste lleve una reproducción en color del frontispicio de la obra de Rösel von Rosenhof, *Insekten Belustigung*, de 1761, en la que unos angelotes se entregan a la recolección de organismos en las orillas de un lago, bajo una divisa de Plinio: *Rerum natura nusquam magis quam in minimis tota est*. También lleva una de las últimas fotografías de Hutchinson en el Wicken Fen inglés, donde de chico colectara insectos, y las últimas líneas de la partitura que Bach estaba escribiendo cuando falleció. Dedica el libro a la memoria de personas especialmente apreciadas:



Frontispicio de Insekten Belustigung, *de Rösel von Rosenhof*

G. Bidder, Edward Deevey, G. Gause, T. Mecan, Edmund Pearce, Grace Pickfordd, Gordon Riley, August Thienemann y Livia y Vittorio Tonolli. Así redondea este monumento a la ciencia y a la amistad.

El texto, quizás inevitablemente, ha quedado un poco desigual; pero destacan temas que apenas afloran en los libros al uso o en las tesis doctorales de los biólogos actuales. Uno se da cuenta muy pronto de la cantidad inmensa de información, espigando en la bibliografía de la especialidad, que es iluminada, de vez en cuando, por sagaces comentarios personales. Aquí y allá también se encuentran opiniones sobre nomenclatura o sobre la formación de términos técnicos. Abundan datos sobre éxito y fracasos en intentos de cultivos, relaciones insospechadas entre especies.

Cualquier revisión rápida es parcial y puede parecer tendenciosa, pero me permitiré señalar informaciones inesperadas sobre la variedad de esponjas en distintos países, migración de las hidras, estructuración del lasion, o sea, el revestimiento aterciopelado de las superficies sumergidas (más o menos equivalente a mi plocon), grado de calcificación y forma de las conchas en moluscos de agua dulce y en relación con el ambiente. Los insectos acuáticos conocidos exceden probablemente de 50.000 especies. Aquí sólo trata de los insectos "primitivos" y de los demás que son acuáticos también en su fase adulta. Se nos recuerdan los grandes efemerópteros del Carbonífero (45 cm de envergadura alar), la formación de enjambres y la supuesta relación con la Luna.

Las libélulas le sirven de ocasión para presentar datos fascinantes y poco conocidos, por ejemplo, sobre la regularidad de su crecimiento: a cada muda de la ninfa, cualquier dimensión lineal aumenta algo más de la quizás esperable raíz cúbica de dos. La vida, el instinto de territorio, tanto de las ninfas como de los adultos de las libélulas, se prestan a muchos comentarios.

Los heterópteros fueron siempre sus favoritos. Por eso, la parte del capítulo que a ellos se dedica incluye numerosos detalles, también de taxonomía y biogeografía. La evolución de las características (incluidas las asimetrías) y del comportamiento (alimentación, estridulación, enjambrazón) en los distintos grupos de heterópteros acuáticos es, ciertamente, admirable. Ochenta y tres páginas, con cerca de 2000 referencias, concluyen el volumen. (R. M.)

Rayos cósmicos

Escuela de Korff

FRONTIERS IN COSMIC PHYSICS. Dirigido por Rosalind B. Mendell y Allen I. Mincer. The New York Academy of Sciences; Nueva York, 1992.

El libro está dedicado a la memoria del profesor Serge Alexander Korff y recoge las contribuciones presentadas en un congreso celebrado en su honor un año después de su fallecimiento. Korff trabajó principalmente en "rayos cósmicos", término un poco confuso que engloba todos aquellos fenómenos relacionados con la interacción de partículas de origen cósmico con la atmósfera terrestre. Y eso se refleja en el sumario: las contribuciones cubren muy diversos aspectos de la física de rayos cósmicos y sus aplicaciones en geofísica, física solar, etcétera. Pero la variedad de temas abordados no se corresponde con el interés de cada desarrollo.

En la introducción biográfica se bosquejan los principales trabajos de Korff, en particular, su estudio de la formación de neutrones libres debido a la interacción de rayos cósmicos con las capas superiores de la atmósfera, su difusión hacia la superficie y su absorción por núcleos de ^{14}N atmosférico con la posterior formación de ^{14}C tras la emisión de un protón. De manera sucinta se hace referencia a las desavenencias que mantuvieron Korff y Libby por la prioridad atribuida a este último en el descubrimiento del ^{14}C como herramienta para el fechado de muestras arqueológicas y por el cual se le otorgó el premio Nobel, en detrimento del trabajo del primero.

Los artículos van desde el problema de los neutrinos solares al origen de rayos cósmicos y la abundancia relativa de isótopos de un mismo elemento, pasando por astronomía en el óptico, ultravioleta, visible e infrarojo. Sin embargo, no existe la ligazón lógica de un simposium dedicado a un tema específico, ni tampoco se da siempre una visión global de las cuestiones.

Merece la pena mencionar, por su calidad, el trabajo de J. Sympson sobre los múltiples mecanismos en que las partículas se ven aceleradas por el viento solar y que son representativos de los fenómenos que ocurren en la galaxia, o el resumen de R. Davies de los problemas asociados a la detección de neutrinos solares.

J. Kurfess presta atención a los satélites que trabajan en la detección de fuentes de rayos gamma, pero sólo cita en una nota final la existencia de explosiones de rayos gamma y apenas se detiene en el problema de su distribución, cuando el estudio y naturaleza de estas fuentes es una de las cuestiones que revisten mayor interés.

Junto a artículos de corte clásico, se presentan algunos más especulativos sobre la naturaleza de la materia oscura y su posible importancia en el origen de los rayos cósmicos, o de carácter divulgativo sobre la posible instalación de observatorios en la Luna, e incluso se resucitan modelos cosmológicos (el de Tolman).

En general, el volumen carece de homogeneidad. No es una recopilación en que el mismo problema se aborde desde diferentes ángulos. Aquí tenemos una revisión de muy diversas disciplinas cuyo lazo de unión es vagamente la física de rayos cósmicos, y más propiamente el trabajo de las diferentes generaciones de alumnos de Serge Korff. (F. A.)

Sociología de la ciencia

Genética alemana

STYLES OF SCIENTIFIC THOUGHT. (THE GERMAN GENETICS COMMUNITY 1900-1933), por Jonathan Harwood. The University of Chicago Press; Chicago, 1993

Se tiene por costumbre legítima dudar de la competencia del filósofo de la ciencia que no tenga una solvencia científica que le avale. Lo mismo cabe decir del sociólogo de la ciencia. Dicha duda legítima se desvanece en el caso que aquí se considera por el dominio que Harwood despliega en el conocimiento de la genética de la primera mitad de este siglo. Conocimiento que, excluyendo el área de la genética humana, interpreta desde una perspectiva sociológica en lo que respecta a la comunidad genética alemana.

En esta obra se trata de mostrar que las particularidades que identifican a la comunidad de genéticos alemanes, a partir del año 1900 y hasta la aparición del nazismo (1933), reflejan el microcosmos de problemas y procesos que caracterizan, a su vez, la modernización de Alemania.

Se parte de la circunstancia de que, paralelamente al ritmo de industrialización acelerado de los últimos lustros del siglo XIX, los jóvenes procedentes de los nuevos estratos

sociales acomodados se iniciarían cada vez en mayor número en los estudios universitarios. Sin embargo, los ideales de su clase social, así como su formación escolar, no se identificaban con los ideales de la educación clásica (*Bildung*) que imperaban en la universidad decimonónica. De esos nuevos estudiantes, muy pocos de entre los que intentaron labrar su futuro en la comunidad académica se identificaron con el entendimiento tradicional del académico clásico (*mandarin*) cuya dedicación a la investigación pura y al bienestar de la nación alemana le harían autoproclamarse guía espiritual de la misma.

Sobre esta base documenta su tesis: al tener estos nuevos universitarios poco en común con la clase media tradicional —que acaparaba casi todas las cátedras así como los altos cargos del funcionariado— se constituían en forasteros académicos. Estos desempeñarían el papel más limitado de "expertos", y en el conjunto de la sociedad ofrecerían, en vez de sabiduría (*Kultur*), un conocimiento especializado, propio de la civilización occidental ajena a la cultura alemana (*Zivilisation*).

De esta manera, la actividad investigadora se bifurcaría en la vertiente dominante y generalista de los mandarines (representada por Alfred Kühn) y la minoritaria, especializada y pragmática de los forasteros (representada por Erwin Baur). Los generalistas, por su lado, tendrían un interés notable en la filosofía, el arte y el conocimiento humanístico, mientras que los pragmáticos carecerían de intereses de clase, aunque sí manifestarían una tendencia a comprometerse con distintas fuerzas políticas, compromiso que en los generalistas sería pasivo.

De esta manera, los mandarines y los forasteros rara vez se ocuparían en los mismos problemas genéticos y habría poca competencia por los mismos recursos económicos. De hecho estarían ubicados en distintas instituciones académicas. Por tanto, sus diferentes perspectivas no entrarían en conflicto, salvo en un área que Harwood estudia con especial interés: la herencia citoplasmática.

Se enfrentaba ahí la dotación cromosómica al citoplasma, concediéndose mayor importancia a una u otro según la propensión generalista o pragmática de los protagonistas. De esta manera, por ejemplo, la relación del gobierno de la República de Weimar (cromosomas) con la nación alemana (citoplasma) haría que la ciencia genética y la teoría sociopolítica se correspondieran en un reflejo mutuo de interpretaciones.

Los investigadores implicados se concentraban en la teoría del plasmón, de Fritz von Wettstein, que se modificaría así, en uno u otro sentido, según los condicionantes sociales indicados. En definitiva, se generarían dos estilos de hacer ciencia (que obedecerían a intereses sociopolíticos opuestos), y un tercero, intermedio (representado por Richard Goldschmidt). En este último grupo cabrían todas las anomalías que no se ajustaran al esquema presentado.

En su conclusión, Harwood pretende generalizar la dicotomía expuesta a otras disciplinas como puedan ser la física (Mach-Planck), las matemáticas (Hilbert-Klein) o la bioquímica (Fischer-Hofmeister). E incluso, esa pretensión se lleva a otros entornos nacionales como son la genética de la evolución en el Reino Unido (Pearson-Bateson) y, sobre todo, en EE.UU. (Morgan-Dobzhansky).

Richard Goldschmidt (1878-1958)

Toda esta tesitura se desarrolla a lo largo de dos partes y nueve capítulos. En un capítulo introductorio, se traza la línea argumental con el método y contexto del estudio que se presenta. Acto seguido, una parte I, dedicada a las peculiaridades de la genética alemana, se desglosa en 4 capítulos. Los 2 primeros centrados, respectivamente, en la genética del desarrollo y en la genética del proceso evolutivo. Mientras que los 2 siguientes se consagran a un análisis comparado de la genética americana (pragmática en general, destacándose la génesis de la solución práctica de George Beadle que desembocaría en la conocida expresión: un gen-una enzima) y de la alemana (generalista en su conjunto y parca en resultados prácticos). Se amplía esta interpretación a la psicología, donde se contrapone el conductismo americano con la concepción *Gestalt* alemana.

En una Parte II, se entra plenamente en la tesis directriz del trabajo sobre los distintos estilos de pensamiento científico en la comunidad de genéticos en Alemania. Esta parte se divide también en 4 capítulos, en el primero se cartografía la comunidad en cuestión, ya en el segundo se distinguen los estilos implicados (generalista y pragmático), para en el tercero explicitar las reacciones de los mandarines al proceso de modernización en Alemania. Por fin, en el último capítulo se estudian las metáforas que usan los contendientes para ilustrar sus ideas. Una conclusión, clara y concisa, resume la obra.

Como crítica general a este trabajo, se tiene que acentuar la autocrítica misma que se hace el autor a lo largo de toda su argumentación, y especialmente en su conclusión. Es decir, para fundamentar la tesis general planteada, los datos biográficos y prosopográficos recogidos (así como los provenientes de 26 entrevistas clave), a menudo son demasiado amplios e imprecisos. De cualquier modo, dicha tesis general es válida, aunque la documentación analizada no sea suficiente más que para estimular la realización de otros estudios de la misma naturaleza que confirmen las pretensiones del autor. (C. C.)

Apuntes

No todo en ciencia es apodíctico. Lo cual no le resta valor. La creación de modelos numéricos de los sistemas y procesos complejos es, por lo menos necesaria, cuando no la única estrategia viable. Por tratarse a menudo de sistemas abiertos, así en los modelos hidrológicos y geoquímicos, no es posible verificarlos ni validarlos, pero nadie puede negarles su valor heurístico.

Cuando una molécula hace fortuna, la investigación se centra en ella en busca de nuevas virtualidades. Se cumple ello en el óxido nítrico. Se sabe que el NO regula la acción asesina de los macrófagos sobre células tumorales y bacterias e insta reacciones biológicas muy dispares. Lo mismo desempeña funciones neurotransmisoras que dilata los vasos sanguíneos, e incluso, con sobrada concentración, media los efectos neurotóxicos que ejerce el glutamato. Se habla ahora de una cascada de acontecimientos que parte del NO. Siendo éste radical libre, daña el ADN, lesión que activa una enzima que promueve el engarce de la ADP-ribosa a ciertas proteínas; por último, el consumo de ADP-ribosa priva a la célula de energía y de un cofactor necesario para las reacciones productoras de energía.

¿Por qué el estómago no se digiere a sí mismo con los jugos que segrega? Porque existe una barrera de mucus-bicarbonato que tapiza el lumen y ciertas porciones superficiales de las glándulas gástricas. Pero, ¿y cómo se salvan las células interiores de las glándulas, carentes de barrera mucosa? Porque, según se ha visto, excluyen el amoniaco y el dióxido de carbono, al que esas células son permeables.

Los modelos que, para explicar los campos magnéticos adquiridos por las galaxias, acuden a la teoría de la dinamo, todavía imperante, no saben cómo justificar los inmensos campos iniciales que requerirían las galaxias jóvenes: la densidad de energía en esos campos de microescala debe superar, con mucho, la densidad de energía cinética local. Se obvia esa dificultad si el mecanismo responsable fuera un inmenso agujero negro instalado cerca del núcleo galáctico.

Perversión de la red trófica debiera llamarse el fenómeno siguiente: a raíz del declive de los bosques holandeses a causa de la lluvia ácida, ciertas aves que en ellos moran comenzaron a poner huevos de cáscara porosa y menguada viabilidad. Se ha descubierto la sucesión de anillos engarzantes: la acidificación merma el calcio del suelo, deficiencia nutritiva que limita el crecimiento de las poblaciones de caracoles, principal fuente de calcio de esas aves.

Contra el sarampión de los prejuicios, la vacuna de la ciencia. La denostada colonización española de América que habría llevado todos los males y habría diezmado las poblaciones indias a fuego y enfermedad, se ha puesto, desde un nuevo flanco, en entredicho. Las epidemias de tuberculosis acabaron con muchos nativos, pero el microbio responsable estaba allí antes de Colón, como ha demostrado el examen de restos momificados del Perú.

Los gritos y los susurros tienen una distinta expresión matemática en el cerebro. Sirviéndose de prótesis implantadas en sordos, se ha comprobado que los estímulos de alta frecuencia se ajustan a una transformación logarítmica en la cóclea en tanto que los sonidos de baja frecuencia se transmiten linealmente hasta que se produce una transformación logarítmica en el núcleo coclear del sistema nervioso central.

El descubrimiento reciente del quark cima ("top") nos trae a la memoria cierta anécdota protagonizada por Niels Bohr, a quien se reconoce como uno de los fundadores de la teoría cuántica. Cuenta su alumno, colaborador y biógrafo Abraham Pais que el último día del mes de enero de 1958 Pauli dio una conferencia en la Universidad de Columbia sobre las aportaciones de Heisenberg y él mismo al campo de las partículas elementales, lección magistral a la que asistía Bohr. Tras la exposición, Pauli se acercó a Bohr y le dijo: "A Ud. quizás estas ideas le parezcan estrambóticas". A lo que Bohr repuso: "Me lo parecen aunque, por desgracia, no lo bastante".

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LUCHA POR LA CONQUISTA DEL ESPACIO, por John M. Logsdon y Alain Dupas

En 1961, John F. Kennedy hizo cuestión de honor patrio el que los Estados Unidos fueran los primeros en llegar a la Luna. Pero, ¿tenían los soviéticos posibilidades de ganar la carrera?

POLIMORFISMO MHC Y ORIGEN DEL HOMBRE, por Jan Klein, Naoyuki Takahata y Fracisco J. Ayala

La diversidad de tipos tisulares humanos se generó mucho antes que apareciese el Homo sapiens.

EL LIMITE CLASICO DEL ATOMO, por Michael Nauenberg, Carlos Stroud y John Yeazell

Los físicos creen que mediante la creación de átomos enormes podrán estudiar el tránsito de la física cuántica a la mecánica clásica de la experiencia cotidiana.

EMOCION, MEMORIA Y CEREBRO, por Joseph E. LeDoux

Se han conseguido identificar las vías nerviosas que subyacen bajo la formación de recuerdos relacionados con el miedo y otras experiencias emotivas primitivas.

CIUDADES ANDINAS DE LA ANTIGÜEDAD, por Shelia Pozorski y Thomas Pozorski

Hace unos 3800 años, Pampa de las Llanas-Moxeke y Taukachi-Konkan fueron centros urbanos, cuidadosamente proyectados, que albergaron a muchos cientos de personas.

OPTICA ADAPTATIVA, por John W. Hardy

La tecnología desarrollada durante la guerra fría devuelve la vitalidad a los telescopios astronómicos terrestres.

BASE SENSORIAL DEL LENGUAJE DE LA DANZA DE LAS ABEJAS MELIFERAS, por Wolfgang H. Kirchner y William F. Towne

Experimentos recientes, en los que se entrena a las abejas para que respondan a estímulos sonoros y se las recluta utilizando un robot, han terminado con los debates en torno al lenguaje de la danza.

LA SALUD DEL MAR MEDITERRANEO, por Joandomènec Ros

¿Está amenazado de muerte el Mediterráneo? No, pero los efectos del hombre, desde la pesca hasta la ocupación y transformación del litoral, pasando por la contaminación, se dejan sentir en todo su perímetro.

